



Greining á ásvindmyllu í vindálagi til orkuframleiðslu

Bórður Sigurbjartsson

Lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði BSc

2012

Höfundur: Börður Sigurbjartsson

Kennitala: 030789-3349

Leiðbeinandi: Jón E. Bernóðusson

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering



Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Greining á ásvindmyllu í vindálagi til orkuframleiðslu

Námsbraut:

Vél- og orkutæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði BSc

Önn:

7

Námskeið:

VT-LOK-1012

Ágrip:

Meginmarkmið þessa verkefnis er að komast að því hvað ásvindmyllan, sem Jón E. Bernóðusson hannaði, getur afkastað miklu afli. Byrja þarf á því að hanna og smíða styrkingar á vindmylluna þar sem hún þolir ekki vindálag við mikinn vindstyrk. Framkvæmdar verða mælingar á ásvindmyllunni í vindgöngum Háskólans í Reykjavík ásamt því að farið verður með hana austur í Þykkvabæ og teknar aflmælingar á henni þar. Niðurstöður aflmælinga í vindgöngunum og niðurstöður mælinga í Þykkvabæ verða svo bornar saman. Einnig verður fræðilegt afl ásvindmyllunnar skoðað og borið saman við mesta fræðilega afl sambærilegra vindmylla.

Höfundur:

Þórður Sigurbjartsson

Umsjónarkennari:

Indriði Sævar Ríkharðsson

Leiðbeinandi:

Jón E. Bernóðusson

Fyrirtæki/stofnun:

Siglingamálastofnun

Dagsetning:

06.12.2012

Lykilorð íslensk:

Vindmylla, ásvindmylla, vindgöng

Lykilorð ensk:

Windturbine, VAWT, wind tunnel

Dreifing:

opin

lokuð

til:

Formáli

Afhverju eru ekki fleiri vindmyllur á Íslandi hugsaði höfundur kvöld eitt, þegar sumarsólin var við það að setjast, í heitum potti austur í Þykkvabæ, um leið og trén stóðu nánast lárétt vegna hvassviðris. Af hverju eru vindmyllur ekki sjáanlegri hér á Íslandi eins og til dæmis í Hollandi, Danmörku, Þýskalandi og á fleiri stöðum í heiminum? Ekki vantar vindinn, svo mikið er víst.

Eftir að skýrsluhöfundur hafði kynnt sér vindmylluiðnaðinn lauslega í bókum og á veraldarvefnum ákvað hann að skoða hvort möguleiki væri á að gera lokaverkefni tengt vindmyllum og mögulegum nýjungum í þeim geira.

Skýrsluhöfundur hafði samband við Jón E. Bernóðusson starfsmann Siglingastofnunar og var erindið borið upp, sem hann tók fagnandi. Jón hefur í gegnum tíðina leiðbeint nemendum sem hafa haft áhuga á endurnýtanlegum orkugjöfum. Jón hafði, í samstarfi við Siglingamálastofnun, látið smíða nýja útfærslu af vindmyllu, ásvindmyllu eins og hún verður kölluð í þessari skýrslu. Eftir stutt samtal var ákveðið að höfundur tæki að sér að gera mælingar og ljúka við smíði á ásvindmyllunni sem Jón hafði hannað.

Fljótlega kom í ljós að töluverð vinna var fyrir höndum þar sem ásvindmyllan hafði fengið að snúast í öllum veðrum án þess að vera nægilega styrkt. Skipta þurfti um stóran hluta myllunnar, en meðal annars þurfti að skipta út legum og hanna festingar.

Skýrsluhöfundur vill nota tækifærið og þakka Jóni E. Bernóðussyni fyrir stuðninginn við gerð þessa verkefnis, Gísla Frey Þorsteinssyni fyrir aðstoðina við nýsmíði vindmyllunnar. Einnig vill höfundur þakka Indriða S. Ríkharðssyni fyrir að hafa hjálpað til við endurskipulagningu þessa verkefnis og aðstoðina í framhaldi af því, þegar leiðbeinandi þessa verkefnis, Jón E., veiktist skyndilega.

Reykjavík 6. desember 2012

Þórður Sigurbjartsson

Efnisyfirlit

1	Inngangur	1
1.1	Markmið	2
1.2	Yfirlit	2
2	Upphaf nýtingar á vindorku	3
2.1	Nýting vindorkunnar	4
2.2	Möguleikar Íslands á nýtingu vindorku	5
2.2.1	Kostir	5
2.2.2	Gallar	6
3	Tvær algengustu tegundir vindmylla og uppruni þeirra	7
3.1	Ásvindmyllur, VAWT	7
3.1.1	Viðnámskraftur	8
3.2	Spaðavindmyllur, HAWT	11
3.2.1	Lyftikraftur	12
4	Hönnun ásvindmyllunnar og smíði	15
4.1	Hönnun	15
4.2	Styrkingar	19
5	Mælitækin	21
5.1	Vindgöng	21
5.2	Snúningshraðamælir	22
5.3	Kraftvog	23
5.4	Vindhraðamælir og Veðurstöð Íslands	25
6	Fræðin við nýtingu vindorku	26
6.1	Mesta fræðilega afl vindorkunnar	26
6.1.1	Betz lögmálið	27
6.1.2	Afl Persian og Savonius vindmylla	28
6.1.2.1	Persian vindmyllur	28
6.1.2.2	Savonius vindmyllur	29

7	Mælingar og úrvinnsla	32
7.1	Framkvæmd mælinga í vindgöngum	32
7.2	Niðurstöður mælinga í vindgöngum	33
7.2.1	Lámarksvindhraði ásvindmyllunnar í vindgöngunum	33
7.2.2	Eigintíðni og óstöðugleiki	33
7.2.2.1	Eigintíðnir fundnar með Ansys greiningu	34
7.2.3	Afl vindmyllunnar	35
7.2.4	Öryggi	38
7.3	Framkvæmd mælinga og uppsetning í Þykkvabæ	39
7.3.1	Uppsetning vindmyllunnar	39
7.3.2	Framkvæmd mælinga	40
7.4	Niðurstöður mælinga í Þykkvabæ	40
7.4.1	Veðurgögn	41
7.4.2	Eigintíðni og óstöðugleiki	41
7.4.3	Afl vindmyllunnar	42
7.5	Samanburður	43
7.6	Fræðilegt afl ásvindmyllunnar	44
7.7	Raforkuframleiðsla	47
8	Niðurstöður	48
9	Lokaorð og næstu skref	50
	Heimildaskrá	53
	Viðauki A Mælingar í vindgöngum. Lámarksvindhraði mældur	54
	Viðauki B Snúningshraði vindmyllu í vindgöngum mældur án álags	55
	Viðauki C Stilling á tíðni vindganganna	56
	Viðauki D Afmælingar á vindmyllu í vindgöngum skólans	57
	Viðauki E Afmælingar á vindmyllu í Þykkvabæ	60
	Viðauki F Vindhraðamælingar í Þykkvabæ	64
	Viðauki G Viðnámsstuðlar, C_D og C_L	67
	Viðauki H Veðurgögn frá Veðurstofu Íslands	68
	Viðauki I Útreikningar á fræðilega mesta afli Ásvindmyllunnar	70

Viðauki J	Anslys greining	73
Viðauki K	Smíðateikningar	76

Myndaskrá

2.1	Persian vindmylla.	3
2.2	Virkjuð vindorka í heiminum á árunum 2001-2012.	4
3.1	Vindmylla með kínverskan uppruna.	8
3.2	Kraftamynd af flugvél sem er á flugi.	9
3.3	Viðnámskraftur í ásvindmyllu.	9
3.4	Svona litu fyrstu spaðavindmyllurnar út.	11
3.5	Spaðavindmylla með viftuskotti og vindmyllur eins og þær eru í dag.	12
3.6	Einföld útskýringarmynd af flugvélavæng.	13
3.7	Þverskurðarmynd af vindmylluspaða.	14
4.1	Vindmyllan við upphaf verkefnisins.	16
4.2	Ein útfærsla af Savonius vindmyllublöðum.	17
4.3	Ofanvarp af skóflu úr ásvindmyllunni.	18
4.4	Millistykkið.	19
4.5	Hönnun á styrkingum á efri hluta ásvindmyllunnar.	20
4.6	Neðri hluti ásvindmyllunnar.	20
5.1	Hér er búið að koma vindmyllunni fyrir í vindgöngum skólans.	22
5.2	Snúningshraðamæli komið fyrir á fæti vindmyllunnar.	22
5.3	Kraftvog komið fyrir á myllunni.	23
5.4	Kraftamynd af kraftvoginni.	24
5.5	Vindhraðamælir.	25
6.1	Vindur sem fer í gegnum þverskurðarflatarmál A með hraðanum V.	27
6.2	Uppbygging Persian vindmylla.	28
6.3	Virkni Savonius vindmylla.	29
7.1	Eigintíðnir ásvindmyllunnar.	34
7.2	Afl vindmyllunnar í vindgöngunum.	36
7.3	Breyting á vægi með vindhraða og snúningshraða.	37

7.4	Hámarksafi vindmyllunnar í vindgöngum.	38
7.5	Uppsetningu lokið í Þykkvabæ.	39
7.6	Mælingarnar 3 sem framkvæmdar voru við 10 m/s.	42
7.7	Mælingarnar 3 sem framkvæmdar voru við 14 m/s.	43
7.8	Aflstuðlar fyrir mismunandi gerðir vindmylla.	45
7.9	Aflstuðull vindhraðamælis samanborinn við aflstuðul ásvindmyllunnar. . .	46

Töfluskrá

7.1	Hámarksafi vindmyllunnar við ákveðið vægi í vindgöngum.	36
7.2	Samanburðartafla fyrir meðal vindhraðann 10 m/s.	43
7.3	Samanburðartafla fyrir meðal vindhraðann 14 m/s.	44

Kafli 1

Inngangur

Miklar framfarir hafa átt sér stað í heiminum þegar kemur að endurnýtanlegum orkugjöfum og ber þar meðal annars að nefna fallvatnsvirkjanir, jarðvarmavirkjanir, sólarorkuver og vindmylluíðnaðinn. Íslendingar búa yfir mikilli þekkingu í tengslum við jarðvarmavirkjanir og fallvatnsvirkjanir og eru stór íslensk fyrirtæki í mikilli útrás með þessa þekkingu.

Þróun vindmylluíðnaðarins hefur verið hröð síðastliðin ár og hefur nýting á vindorku margfaldast síðastliðin 10 ár. Ísland hefur ekki fylgt þeirri þróun nægilega vel eftir þrátt fyrir að lítil verkefni séu í gangi hér á landi. Skýrsluhöfundur hefur mikla trú á því að á komandi árum muni nýting á þessum óþrjótanlega orkugjafa aukast til muna.

Ásvindmyllan sem fjallað verður um í þessari skýrslu er ekki eins og flestir þekkja vindmyllur. Vindmyllur í dag eru flest allar mjög háar og með stórum spöðum en ásvindmyllan er um 2 metrar á hæð og snýst um lóðréttan ás, öfugt farið við spaðavindmyllurnar sem snúast um láréttan ás. Ásvindmyllan sem Jón E. hafði hannað var smíðuð fyrir nokkrum árum en aldrei höfðu verið framkvæmdar aflmælingar á henni og því ekki vitað hve miklu afli eða rafmagni vindmyllan gæti afkastað. Eins og vitað er þá getur vindhraði á Íslandi farið upp í allt að 70 metra á sekúndu í verstu veðrum og þarf því að hanna vindmylluna með það fyrir augum.

Til að komast að niðurstöðu um hvort að þessi útfærsla af vindmyllu, þ.e. ásvindmylla, sé hagkvæm í þeim veðurskilyrðum sem við þekkjum þá þarf að mæla það afl sem vindmyllan gefur við ákveðin vindstyrk, og þannig komast að því hvort skynsamlegt sé að fara út í frekari hönnun á vindmyllunni.

1.1 Markmið

1. Hanna og smíða styrkingar fyrir vindmylluna.
2. Hanna kraftvog til að mæla afl vindmyllunnar og koma henni fyrir á vindmyllunni.
3. Teikna ásvindmylluna og styrkingarnar upp í þrívíddarforritinu Inventor.
4. Vindmyllan verður sett upp í vindgöngum Háskólans í Reykjavík og niðurstöður bornar saman við mælingar sem fara fram í Þykkvabæ.
5. Vindmyllan verður einnig sett upp í Þykkvabæ við veðurathugunarstöð frá Veðurstofu Íslands.
6. Tekin verða vindgögn úr mælingum á tíu mínútna fresti og á sama tíma verður snúningshraði ásvindmyllunnar mældur.
7. Vægi ásvindmyllunnar verður reiknað út frá mælingum og sett upp í samræmi við snúningshraða.
8. Aflið sem Ásvindmyllan afkastar verður reiknað út miðað við ákveðinn vindhraða.

1.2 Yfirlit

Meginmáli þessarar skýrslu er skipt niður í 7 kafla. Í kafla 2 er fjallað um sögu vindmylla og þróun þeirra síðustu ára. Einnig er fjallað um möguleika Íslands á nýtingu vindorkunnar og kosti og galla tengdum nýtingunni. Í kafla 3 er fjallað um tvær algengustu tegundir vindmylla, ásvindmyllur, sem snúast um lóðréttan ás, og spaðavindmyllur, sem snúast um láréttan ás. Fjallað er um þá krafta sem knýja þessar tegundir vindmylla áfram ásamt því að meginmunur þessara krafta er skoðaður. Í kafla 4 er hönnun ásvindmyllunnar skoðuð ásamt því að útlitað er hvernig vindmyllan var styrkt svo hún myndi þola það vindálag sem kæmi til með að verka á hana. Kaffi 5 fjallar um þau mælitæki sem notuð voru við gerð þessa verkefnis. Kaffi 6 tekur á fræðunum á bak við nýtingu vindorkunnar. Í kafla 7 er fjallað um þær mælingar sem framkvæmdar voru í vindgöngum skólans og í Þykkvabæ, þar sem vindmyllan stóð úti í náttúrunni. Þá er í kaflanum fjallað um úrvinnslu mælinga. Í kafla 8 og 9 eru niðurstöður verkefnisins dregnar saman og framtíð ásvindmyllunnar skoðuð. Einnig eru möguleikar á endurbótum á vindmyllunni skoðaðir og er þeim möguleika velt upp hvort hægt sé að nota vindmylluna í vatni.

Kafli 2

Upphaf nýtingar á vindorku

Vindorka hefur verið beisluð í mörg hundruð ár. Fyrstir til að nýta vindorku eru taldir hafa verið sjómenn og þá til að knýja skip sín áfram með seglum. Lítil þekking var á eðlisfræðinni en þessi nýting á vindorku átti þó eftir að hafa mikil áhrif á þróun seglskipa. Fyrstu vindmyllurnar voru gerðar til að dæla vatni milli staða og til að mala korn, tók þá vindorkan við af mannfólkinu sem áður hafði unnið þessi verk. Fyrstu vindmyllur sem til eru gögn um voru Persian vindmyllur frá gömlu Persíu, sem heitir Íran í dag [1].



Mynd 2.1: Persian vindmylla.
[2]

Á árunum í kringum 1200 voru vindmyllur notaðar til að knýja hinn ýmsa vélbúnað, svo sem smíðahamra, sagir, dælur, mulningsvélar og fleira. Það var svo ekki fyrr en um 1900 sem að rafmagnsframleiðsla hófst með vindmyllum og jókst þá notagildi þeirra til muna.

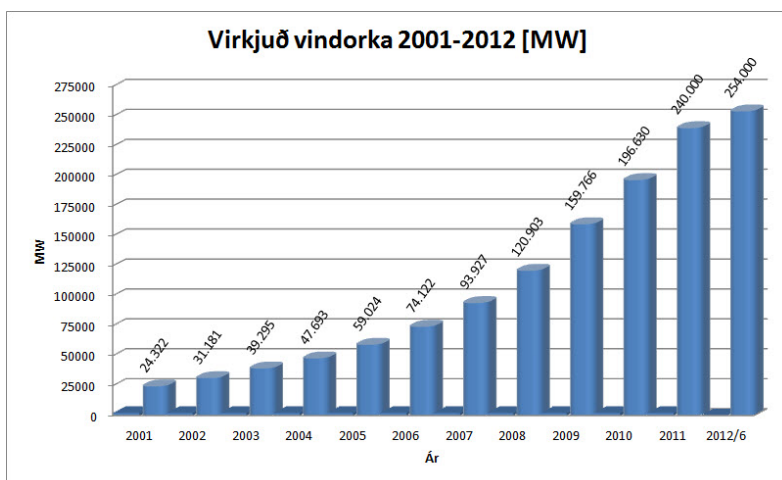
Aðstæður á þessum tíma voru þó þannig að lítil þróun átti sér stað vegna þess að önnur og þekktari orkutækni, til rafmangsframleiðslu, var til staðar og ber þar helst að nefna ódýra olíu, kolakynntar gufuafstöðvar og gasstöðvar en síðar komu svo kjarnorkuverin til sögunnar.

Á seinni árum hefur vindmylluíðnaðurinn orðið að fjöldaframleiðsluáætlun og eru ástæður þess meðal annars skortur á olíu, hátt olíuverð sem og framfarir á sviði efnisfræði og verkfræði. Einnig ber að nefna aukna meðvitund í umhverfis og mengunarmálum en mikil vakning hefur átt sér stað í þeim málum. Upp úr 1990 urðu miklar framfarir í vindmylluþróun í Kaliforníu og má það meðal annars rekja til þess að þá voru vindmylluverkefni ýmist styrkt af ríkinu eða undanskilin sköttum og öðrum gjöldum. Síðan þá hefur verið mikill vöxtur í vindmylluíðnaðinum og lýtur út fyrir að ekkert lát sé á þeim vexti [3].

2.1 Nýting vindorkunnar

Eins og fram hefur komið hafa átt sér stað miklar framfarir á nýtingu vindorku, síðastliðin ár og áratugi. Samkvæmt ársskýrslu frá Alþjóða Vindorkusambandinu, sem gerð var eftir fyrstu 6 mánuði þessa árs, er framleiðslugeta uppsettra vindrafstöðva 250.000 MW, eða 250 GW. Eins og sést í töflunni hér að neðan hefur vindorkuíðnaðurinn vaxið jafnt og þétt síðan árið 2001 en þó bera 5 lönd af [4]. Kína, Bandaríkin, Þýskaland, Spánn og Indland búa yfir 74 % af þessum 250 GW og er framleiðslugeta Kínverja um 67 MW og eiga þeir lang stærstan hluta en á eftir þeim koma Bandaríkjamenn með um 49 MW.

Alþjóða Vindorkusambandið áætlar að framleiðslugetan árið 2015 verði komin upp í 600 þúsund MW og að árið 2020 verði sú tala komin upp í 1500 þúsund MW. Í Bandaríkjunum og í Evrópu hefur vindorka vaxið hvað mest af öllum endurnýtanlegum orkugjöfum síðastliðin ár [5].



Mynd 2.2: Virkuð vindorka í heiminum á árunum 2001-2012.

2.2 Möguleikar Íslands á nýtingu vindorku

Möguleikar Íslands á nýtingu vindorkunnar eru mjög góðir og eru ýmis verkefni í gangi tengd vindiðnaðinum. Til að mynda hefur Landsvirkjun áformað uppsetningu á tveimur vindmyllum og eiga þær að geta afkastað samanlagt um 2 MW og er áætluð hæð rótorsins um 55 metrar og lengd spaðanna um það bil 22 metrar. Síðustu ár hafa Íslendingar verið duglegir við að endurnýta orkuauðlindir og þá sérstaklega vatnsorku og jarðhita. Margar virkjanir hafa verið reistar um allt land í þeim tilgangi að framleiða rafmagn.

Meginástæðan fyrir virkjunum á þessum sviðum er sú að landið er ríkt af fallvötnum og jarðhitasvæðum og er enn möguleiki á frekari nýtingu auðlindanna. Þó hafa framkvæmdir vegna nýtinga á þessum auðlindum mætt mikilli andspyrnu og þá aðallega vegna þess hve mikil eyðilegging á sér stað á stórum landsvæðum en einnig vegna mikilla og stórra mannvirkja sem fylgja nýtingunni. Vakning hefur átt sér stað hér á Íslandi sem og annars staðar í heiminum þegar kemur að umhverfis- og mengunarmálum. Meira er hugsað um náttúruna og reynt eftir fremsta megni að draga úr mengun.

2.2.1 Kostir

Kostir þess að nýta vindorkuna eru meðal annars þeir að lítil sem engin mengun á sér stað, vindur kostar ekkert og er ótakmörkuð auðlind. Byggingartími er stuttur og hefur uppsetning á vindmyllum lítil sem engin óafturkræf áhrif á umhverfi þess lands sem byggt er á. Þó svo að vindmyllugarðar eins og þekkjast erlendis taki stórt landsvæði þá er vel hægt að nýta svæðið í margvíslega hluti, til dæmis að rækta landið eða hafa búfénað á svæðinu. Vindmyllurnar eru það háar að þær hafa ekki áhrif á ræktun svæðis eða búfénað. Mikil og hröð þróun á sér stað í vindmylluiðnaðinum og má því gera ráð fyrir að hagkvæmni eigi eftir að aukast á næstu árum [6].

2.2.2 Gallar

Þó svo að kostir þess að nýta vindorkuna séu margir þá eru einnig gallar við það. Sem dæmi má nefna sjónmengun af völdum vindmylla en þær eru oftast en ekki stórar og miklar. Erlendis eru til vindmyllugarðar þar sem fjöldi vindmylla getur hlaupið á tugum ef ekki hundruðum og geta slíkir garðar haft mikil áhrif á ásýnd landslagsins. Þó svo að talið sé að Ísland sé hentugt til að virkja vind þá er vindur alltaf óstöðugur og rafmagnsframleiðslan óstöðug eftir því. Þrátt fyrir miklar tækniframfarir síðustu ár þá hefur enn ekki fundist góð leið til að geyma orku. Annar galli sem vert er að skoða er hljóðmengun. Áður fyrr var mikill hávaði frá vindmyllum og varla hægt að standa nálægt þeim þegar þær snérust í miklum vindi, en með bættri hönnun, þá sérstaklega á spöðunum, hefur hljóðmengun minnkað töluvert. Hljóðstyrkur frá vindmyllum fellur hratt með fjarlægð og í um 200 metra fjarlægð er hljóðstyrkurinn orðinn svipaður og á skrifstofu. Þar sem vindmyllur eru oftast en ekki stór mannvirki og geta náð upp í mikla hæð þá er sú hættu til staðar að fuglar rekist á þær. Þegar staðsetning vindorkuvirkjana er valin þarf að hafa flugleiðir farfugla í huga. Mikilvægt er að raska flugi þeirra sem minnst og staðsetja vindmyllurnar þannig að lítil hættu sé á ferð fyrir fugla [3].

Kafli 3

Tvær algengustu tegundir vindmylla og uppruni þeirra

Í raun má skipta vindmylluhönnun upp í tvo flokka, annarsvegar þar sem blaðsnúningur er um lóðréttan ás (e. VATW) og hinsvegar þar sem snúningur er um láréttan ás (e. HAWT). Í köflunum hér að neðan verður fjallað nánar um þessar tvær tegundir vindmylla og sögu þeirra. Einnig verður fjallað um þá krafta sem vindmyllan nýtir til að snúast um ás sinn og þannig framleiða rafmang.

3.1 Ásvindmyllur, VAWT

Á ásvindmyllum er blaðsnúningur um lóðréttan ás og er talið að sú hönnun hafi komið á undan hefðbundnum spaðavindmyllum þar sem blaðsnúningur er um láréttan ás. Eins og sést á mynd 2.1 þá er nýting Persian vindmyllunnar skorðuð við eina vindátt og hefur bygging myllunnar verið sniðin að ráðandi vindátt á þeim stað sem myllan var byggð á. Kínverjar eiga sinn þátt í uppbyggingu vindmylluiðnaðarins. Þeir hönnuðu vindmyllu sem var ekki ósvipuð Persian vindmyllunum nema hvað að í þeirra hönnun skipti vindátt ekki máli, myllan snerist óháð vindátt og er talið að sú útfærsla sé um 2000 ára gömul. Vindmyllan virkar þannig að blöðin snúast upp í vindinn eftir að þau hafa tekið á sig vind, þannig minnkar viðnámið töluvert á þeim blöðum sem ekki eru að knýja mylluna áfram, eins og sést á mynd 3.1.

Með því að hafa snúninginn um lóðréttan ás á vindmyllunum þá þurfti ekki að útbúa vinkildrif til að flytja kraftinn niður og var þessi lausn því einfaldari. Er þetta möguleg ástæða þess að ásvindmyllur hafi komið á undan vindmyllum með snúning um láréttan ás.

Margar útfærslur af vindmyllum með snúning um lóðréttan ás komu í kjölfarið og má þar nefna Darrieus vindmylluna hannaða af franska verkfræðingnum Georges Jean Marie Darrieus. Savonius vindmyllan var hönnuð af finnska verkfræðingnum Sigurd Johnnes Savonius árið 1922. Sigurd fékk hugmyndina að vindmyllunni frá túrbínunum, en fyrstu tilraunirnar sem gerðar voru með Savonius vindmyllunum voru einmitt gerðar í ám [7]. Vindmyllan sem fjallað er um í þessari skýrslu er hönnuð með Savonius vindmylluna til hliðsjónar, en nánar verður fjallað um hönnun hennar í kafla 4.1.



Mynd 3.1: Vindmylla með kínverskan uppruna.
[8]

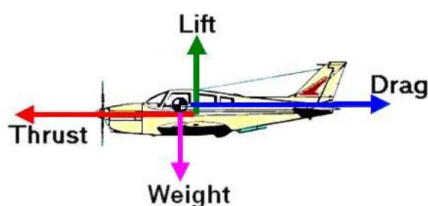
3.1.1 Viðnámskraftur

Viðnámskraftur verður til þegar vökvar eða lofttegundir komast í beina snertingu við hlut, en til þess að viðnámskraftur myndist þarf einnig að vera hraðamismunur á milli hlutarins og loftsins eða vökvans, ef enginn hraðamismunur er til staðar þá er viðnámskrafturinn enginn.

Þar sem viðnámskraftur myndast við hraðamismun milli hluta og vökva eða lofttegunda þá myndast þessi kraftur víða í okkar nánasta umhverfi. Til dæmis verkar viðnámskraftur á bíl þegar hann er á ferð, en einnig þegar hann er kyrrstæður ef það er vindur sem blæs á bílinn. Þá myndast hraðamismunur sem meðal annars veldur kraftinum.

Viðnámskraftur spilar einnig stórt hlutverk þegar flugvélar eru á flugi. Til einföldunar þá má segja að fjórir kraftar virki á flugvélar á flugi eða tvenn kraftapör. Þegar flugvél hefur náð þeirri hæð sem fyrirhugað er að fljúga í þá er lyftikrafturinn (e. lift) jafn stór og þyngdarkraftur jarðar sem verkar á massa flugvélarinnar (e. weigh).

Til að flugvélin fari áfram þá þarf viðnámskrafturinn (e. drag) að vera minni eða jafn kraftinum sem knýr flugvélina áfram (e. thrust) [9].

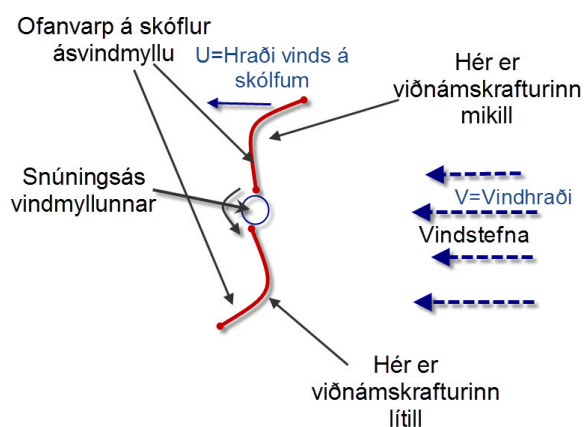


Mynd 3.2: Kraftamynd af flugvél sem er á flugi.
[10]

Allar vindmyllur eru hannaðar með það fyrir augum að nota kraftinn í vindinum til að snúa þeim um ás sinn.

Ásvindmyllur eru oftast en ekki búnar einhvers konar skóflum eða skálum sem taka á sig mikinn vind. Misjafnt er þó, eftir útfærslum, hvort vindmyllur snúist vegna viðnámskrafts eða vegna lyftikrafts. Ásvindmyllur nota nær allar viðnámskraft til að snúa vindmyllunni um ás sinn [11].

Eins og sést á myndinni hér að neðan þá er viðnámskrafturinn meiri á þá skál sem snýr opin að vindstefnunni heldur en á þá skál sem er lokuð á vindstefnuna. Vegna þessa mismunar þá snýst vindmyllan.



Mynd 3.3: Viðnámskraftur í ásvindmyllu.

Til að reikna viðnámskraft er notast við formúlu 3.1

$$F_D = C_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot w^2 \quad [N] \quad (3.1)$$

Þar sem C_D er viðnámsstuðull þess yfirborðs sem vindurinn lendir á, A er þverskurðarflatarmál þess svæðis sem vindurinn fer í gegnum og snýr vindmyllunni og w er afstæði hraðinn, eða mismunur vindhraðans v , og margfeldis hornhraðans og vegalengdarinnar frá miðri vindmyllu og að miðju vindmylluspaðans eða skóflunnar, u . Viðnámsstuðullinn er misjafnlega stór stærð en stærðin fer eftir því hvernig lögun er á því yfirborði sem vindurinn lendir á eins og sjá má í viðauka G.

Afl vindmylla sem nota viðnámskraft sem drifkraft reiknast því samkvæmt formúlu 3.2

$$P_D = F_D \cdot u \quad (3.2)$$

Þar sem $u = \omega \cdot R_m$.

$$P_D = C_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot w^2 \cdot u \quad [W] \quad (3.3)$$

Þar sem $w = v - u$, en fjallað verður nánar um afl ásvindmylla og um viðnámskraft í kafla 6 [9].

3.2 Spaðavindmyllur, HAWT

Talið er að hefðbundnar spaðavindmyllur hafi komið fram á sjónarsviðið á vesturlöndunum löngu eftir að ásvindmyllurnar komu fram. Talið er að upphaf spaðavindmylla megi rekja allt aftur til ársins 1200, en til er mynd af spaðavindmyllu í enskri guðsbók sem er frá þeim tíma.

Fyrstu spaðavindmyllurnar voru svokallaðar staur vindmyllur (e. Post mill). Voru þær mikil uppfinning og grunnur að þeim spaðavindmyllum sem þekktar eru í dag.

Á mynd 3.4 er ein útfærsla af staur vindmyllu. Það var eins með þessar vindmyllur og fyrstu ásvindmyllurnar, það þurfti að sníða þær að ríkjandi vindátt eða þá að snúa þeim handvirkt upp í vindinn.



Mynd 3.4: Svona litu fyrstu spaðavindmyllurnar út.
[12]

Spaðavindmyllurnar höfðu það hlutverk að mala korn. Á fyrstu vindmyllunum var steinn sem malaði korn og var hann efst í vindmyllunni. Þessi vindmylla var svo þróuð og að lokum þurfti ekki að fara með kornið efst í hana heldur var sílóíð fyrir kornið niðri við jörðina og auðveldaði það alla vinnu til muna.

Seinna kom ný útfærsla, hún var ekki ósvipuð upprunalegu spaðavindmyllunni, en þá var búið að bæta lítilli vindmyllu sem kallast viftuskott(e. fantail) aftan við stóru vindmylluspaðana. Viftuskottið sá til þess að vindmyllan sneri alltaf upp í vindinn og með þessari uppgötvun urðu vindmyllur sjálfvirkar að mestu leyti [7].

Enn þann dag í dag byggja spaðavindmyllur á sömu lögmálum og þær gerðu þegar þær komu fyrst fram á sjónarsviðið.

Það sem hefur meðal annars breyst er að turninn sem snýst með spöðunum upp í vindinn er ekki jafn stór og hann var.

Vindmyllur í dag framleiða flest allar rafmagn sem er svo notað til hinna ýmsu verka en þó eru til vindmyllur sem sjá um að dæla vatni milli staða eins og þær voru notaðar upprunalega [7].



Mynd 3.5: Spaðavindmylla með viftuskotti og vindmyllur eins og þær eru í dag.
[13] [14]

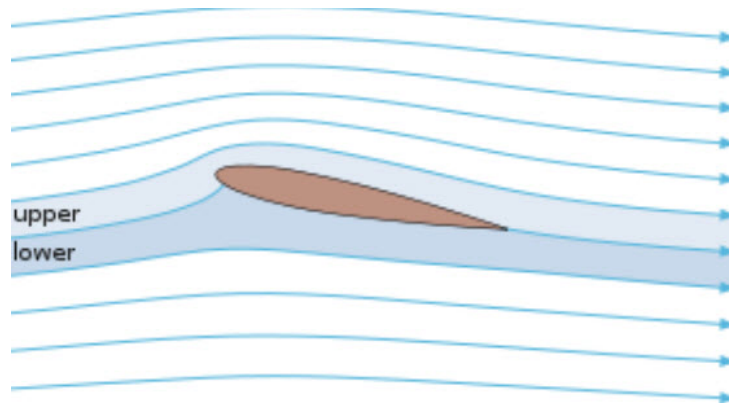
3.2.1 Lyftikraftur

Líkt og áður hefur komið fram er það viðnámskraftur sem er drifkraftur ásvindmylla og knýr þær áfram.

Á síðustu áratugum hafa ásvindmyllur þurft að lúta í lægra haldi fyrir spaðavindmyllum en drifkraftur þeirra er lyftikraftur.

Til einföldunar þá má líta á spaðana í spaðavindmyllum eins og flugvélavængi, en spaðarnir byggja á sömu fræðum og þeir. Til þess að flugvél haldist á lofti þarf lyftikraftur að vera til staðar. Ef flugvél er á flugi og heldur sömu hæð þá er lyftikrafturinn jafn stór og massi flugvélarinnar. Til þess að lyftikraftur myndist þarf loft eða vökvi að vera í beinni sneringu við tiltekinn hlut og einnig þarf að vera hraðamismunur á milli hlutarins og vökvans eða lofttegundarinnar.

Lyftikraftur í vindmyllum verður til þegar vindur lendir á spaðablöðunum og spaðarnir beina vindinum í eina átt og mynda þannig kraft. Samkvæmt þriðja lögmáli Newtons þá á hver kraftur sér gagnkraft og þegar loftinu er beint í eina átt myndast lyftikraftur hornrétt á vindstefnuna og vindmyllan fer að snúast.



Mynd 3.6: Einföld útskýringarmynd af flugvélavæng.
[15]

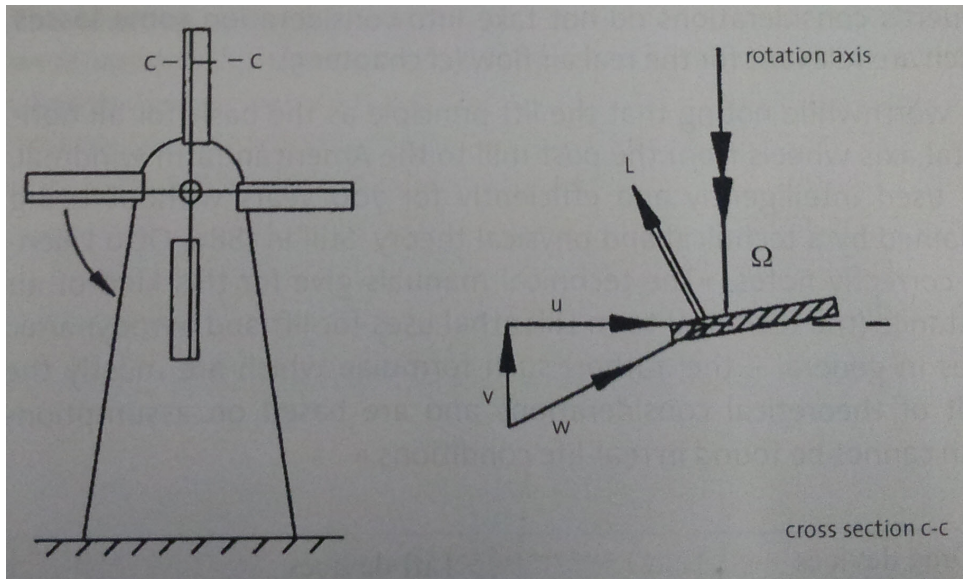
Eins og sést á mynd 3.6 þá beinist loftið, sem hefur farið yfir og undir vænginn, niður aftan við hann og myndar þannig lyftikraft sem snýr vindmyllunni.

Lyftikraftur reiknast út frá formúlu 3.4

$$F_L = C_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot w^2 \quad [N] \quad (3.4)$$

Þar sem C_L er aflstuðull fyrir lyftikraft. Þennan stuðul má finna í gröfum og er hann lesin út frá þeim halla (α) sem vængurinn eða blaðið er í, miðað við vindstefnu, og má sjá dæmi um þann stuðul í viðauka G. A er flatarmál vængsins þegar horft er ofan á flöt hans og w er afstæði hraðinn, eða vindhraðinn, séður frá spöðum vindmyllunnar.

Til að reikna hraðann w þarf að skoða hvernig vindurinn verkar á blöð vindmyllunnar eins og sést á mynd 3.7.



Mynd 3.7: Þverskurðarmynd af vindmylluspaða.
[7]

Eins og sést á mynd 3.7 þá reiknast hraðinn w samkvæmt jöfnu 3.5

$$w = \sqrt{v^2 + u^2} \quad [m/s] \quad (3.5)$$

Þar sem v er vindhraðinn og u er margfeldi hornhraða vindmyllunnar og radíusins að hálfum vængnum eins og sést í jöfnu 6.8.

Þegar búið er að margfalda kraftinn F_L með hraðanum u er hægt að setja fram jöfnuna fyrir afl spaðavindmylla, P_L [16].

$$P_L = C_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (\sqrt{u^2 + v^2})^2 \cdot u \quad [W] \quad (3.6)$$

Kafli 4

Hönnun ásvindmyllunnar og smíði

4.1 Hönnun

Nokkur ár eru síðan ásvindmyllan, sem notuð var við gerð þessa verkefnis, var smíðuð og sá Guðbjartur Einarsson, vélfræðingur hjá VéltaK, um það. Í samstarfi við Siglingamálastofnun hafði Jón E. Bernódusson látið smíða hana eftir að hafa framkvæmt útreikninga á heppilegri stærð og heppilegs sniðs á blöðum myllunnar. Eftir að ásvindmyllan var smíðuð var henni komið fyrir utandyra í því skyni að sjá hvernig til hafði tekist, og viti menn, hún snerist í tiltölulega litlum vindi.

Mánuðir og ár liðu og vindmyllan stóð úti og snerist. Myllan er 2 metrar á hæð og þar af eru spaðarnir 1,2 metrar á hæð í heildina. Myllan var smíðuð þannig að skífurnar, eða blöðin sem taka á sig vind, eru 20 cm á hæð og 40 cm breiðar hver. 6 skífum er svo rennt upp á ál rör sem sest á öxul við undirstöðu myllunnar og er flöturinn sem vindurinn verkar á því 40 cm á breidd og 120 cm á hæð. Það er því töluvert átak sem verkar á vindmylluna þegar vindhraðinn er mikill og því ákvað skýrsluhöfundur að styrkja þyrfti vindmylluna og hófst handa við að hanna styrkingarnar.

Þegar vindmyllan var skoðuð nánar kom í ljós að legurnar sem voru settar í undirstöðurnar við nýsmíðina voru ónýtar og var ástæðan talin vera sú að vatn hefði komist að þeim og skemmt. Þá kom einnig í ljós að álrörið sem skífurnar renna upp á hafði bagnað við átökin í vindinum. Megin ástæðan fyrir því að álrörið sem gengur upp á öxulinn bagnaði er sú að það eru aðeins 50 mm af öxlinum sem ganga inn í álrörið og því bagnaði það þar sökum þess að vægið um þann punkt er gríðarlega mikið þegar vindurinn blæs á mylluna. Það var því ljóst að töluverður tími og vinna átti eftir að fara í að laga og endurbæta vindmylluna.

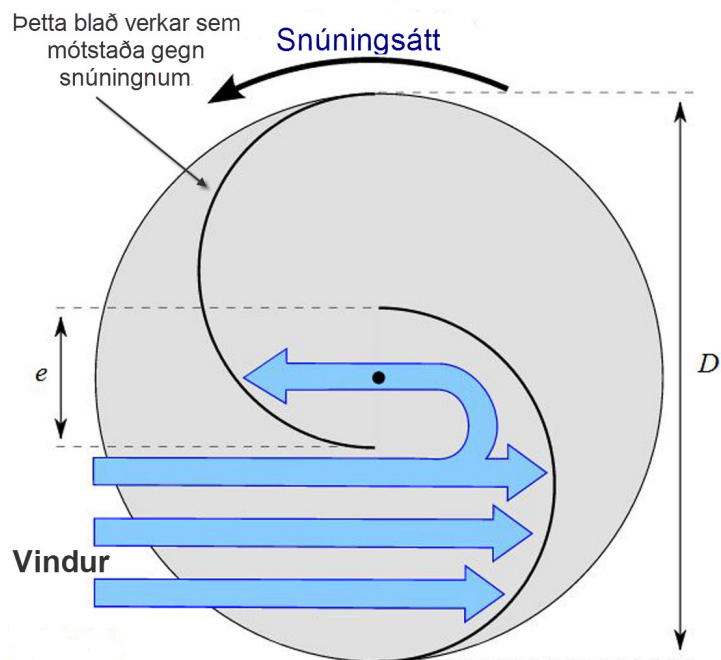
Tvær legur eru í undirstöðu myllunnar, sú efri er sérstök kúlulega sem tekur á sig þyngd vindmyllunnar, en neðri legan er venjuleg kúlulega sem heldur öxlinum á sínum stað.



Mynd 4.1: Vindmyllan við upphaf verkefnisins.

Eins og fram hefur komið er vindmyllan hönnuð eftir forskrift finnska verkfræðingsins Sigurd Johnnes Savonius, en árið 1922 hannaði hann Savonius vindmylluna. Hugmynd hans var að notast við sveigð blöð en fyrir hans tíma höfðu verið framkvæmdar margar tilraunir með það fyrir augum að nota sveigð blöð í ásvindmyllur.

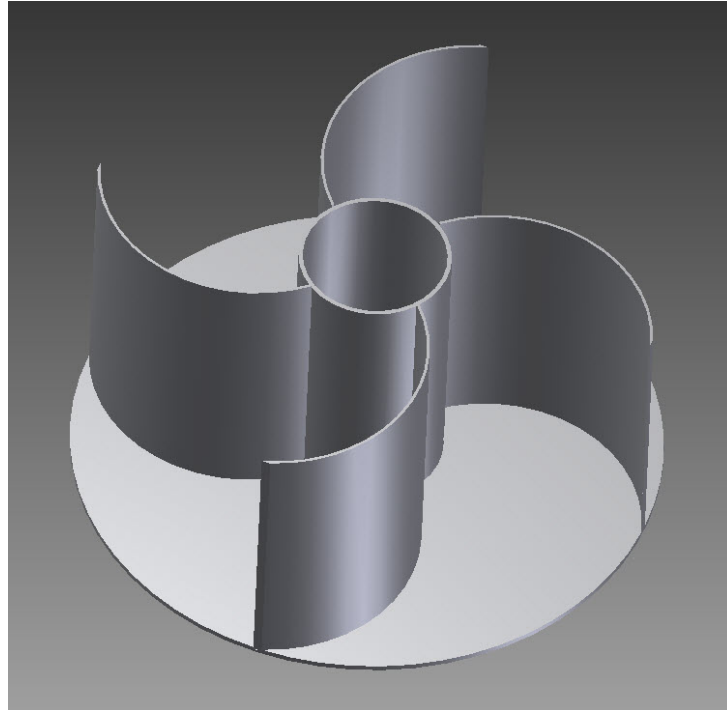
Á mynd 4.2 er ein af mörgum útgáfum af Savonius vindmyllunni, en í þessari útfærslu eru blöðin hönnuð þannig að í raun má ímynda sér að þau séu útbúin með því að skera hring í tvennt og hliðra svo helmingunum eins og sést á myndinni hér að neðan þar sem e tákna hliðrun blaðanna og er sú stærð mismunandi eftir útfærslum.



Mynd 4.2: Ein útfærsla af Savonius vindmyllublöðum.
[17]

Misjafnt er hvort opið er á milli blaðanna en eins og sést á mynd 4.2 þá nýtist vindurinn, eftir að hafa verkað á það blað sem snýr að honum, til að ýta á eftir því blaði sem verkar sem mótstaða gegn snúningi. Fjöldi blaða í Savonius vindmyllum er breytilegur en algengast er að fjöldinn sé frá tveimur og upp í fjögur blöð.

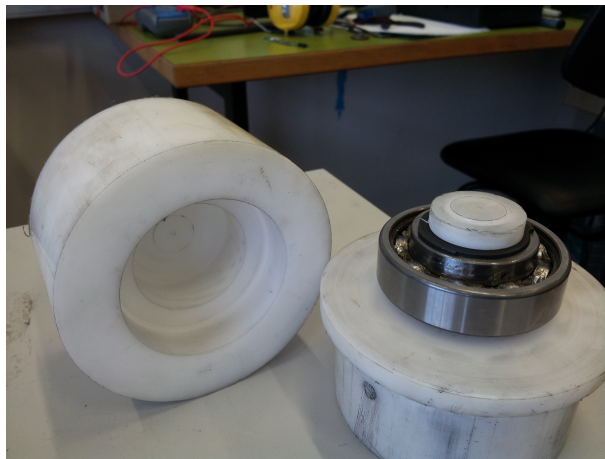
Eins og fram hefur komið var stuðst við Savonius vindmylluna við hönnun á þeirri vindmyllu sem skýrslan fjallar um. Ólíkt skóflunni á mynd 4.2 þá er ekki opið á milli blaðanna fjögurra, en ákveðið var að hafa 4 blöð í hverri skóflu.



Mynd 4.3: Ofanvarp af skóflu úr ásvindmyllunni.

4.2 Styrkingar

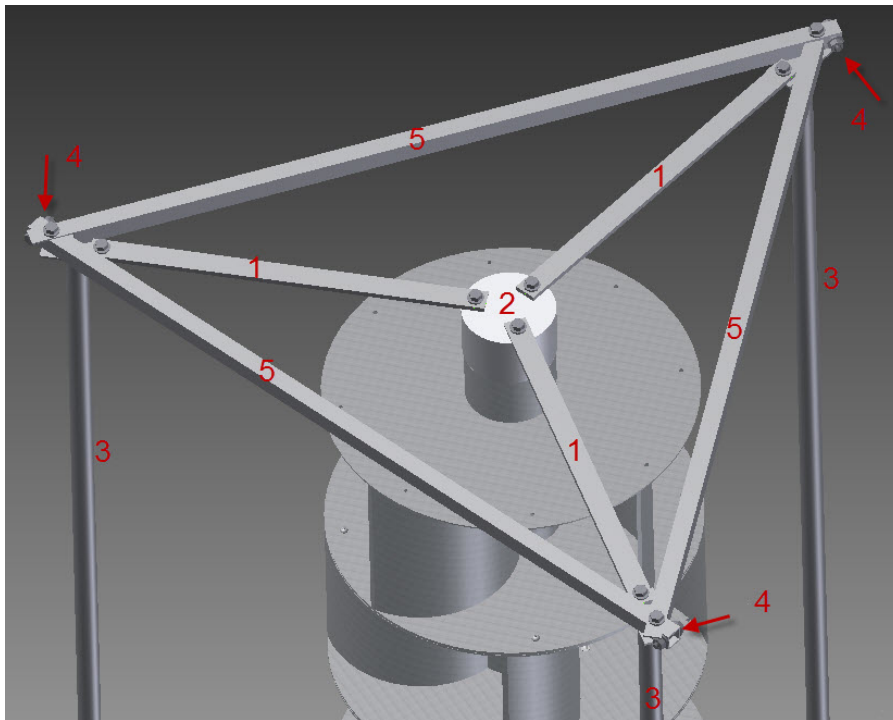
Líkt og áður sagði hafði álörrið bagnað og því ljóst að breyta þyrfti undirstöðu álrórsins og nota sterkara rör. Sú breyting hefði krafist endurhönnunar á undirstöðunni og hefði þá þurft að smíða undirstöðuna upp á nýtt, það hefði verið mikil vinna sem framkvæma hefði þurft á stuttum tíma. Í staðinn var hafist handa við að hanna styrkingu til að halda við rörið að ofanverðu. Þar sem takmarkaður tími var til stefnu var einfaldleiki hafður að leiðarljósi. Í ljósi þess var ákveðið að nota plast (POM) í stykkið sem rennur ofan í álörrið og festist við það en fljótlega er að renna plast heldur en stál eða ál. Á það stykki var sett lega eins og sést á mynd 4.4. Ofan á leguna var síðan sett hulsu og í þá hulsu festast armar sem festast út í járnörin. Þessi tvö stykki eru kölluð millistykki í þessari skýrslu.



Mynd 4.4: Millistykkið.

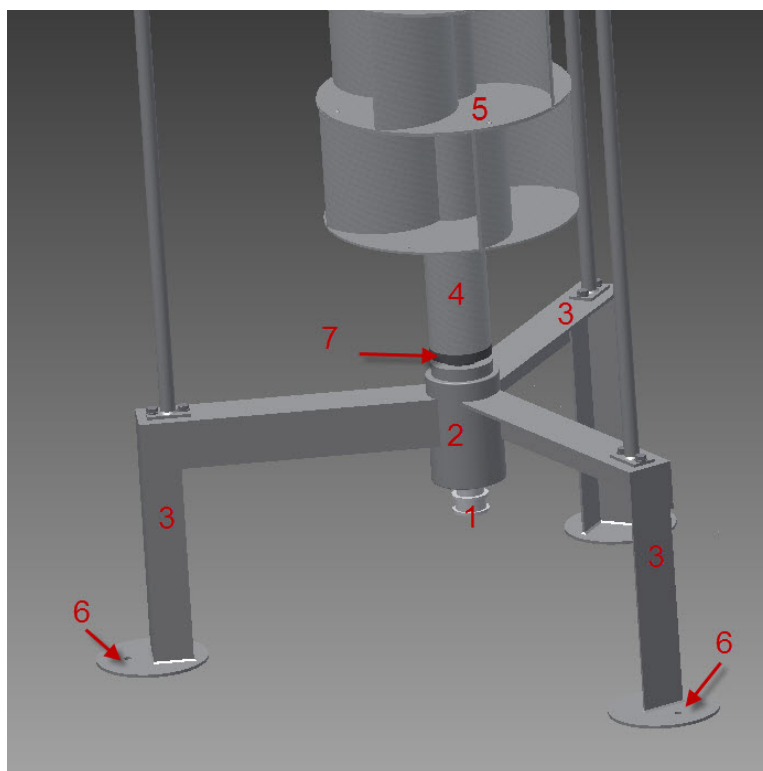
Samhliða smíðinni á millistykkinu voru járnörin soðin á undirstöðir vindmyllunar. Þegar þeirri smíði var lokið, ásamt smíðinni á millistykkinu, var þrem flatjárnnum komið fyrir frá efri hluta millistykkisins og út á járnörin. Við hönnun á styrkingum var gert ráð fyrir að hægt yrði að taka vindmylluna í sundur og voru boltar notaðir til að festa járnörin við undirstöðuna, til að festa flatjárnið við járnörin og efri hluta millistykkisins.

Fyrirhugað var að láta þessar styrkingar duga og ekki var talin þörf á frekari stífungum. Eins og kemur fram í kafla 7 hér á eftir þá var snúningshraðinn það mikill á vindmyllunni að ákveðið var að bæta styrkingum á milli allra járnöranna, sem voru reist ofan á undirstöðurnar, og þannig styrkja vindmylluna enn frekar.



- 1 Armur úr flatjárni
- 2 Millistykki
- 3 Járnrör
- 4 Festipunktur fyrir stög
- 5 Viðbótarstyrking úr prófíl

Mynd 4.5: Hönnun á styrkingum á efri hluta ásvindmyllunnar.



- 1 Reimhjól
- 2 Leguhús
- 3 Undirstöður
- 4 Álrör
- 5 Skóflur
- 6 Göt fyrir steypu-styrktarjárn
- 7 Öxull

Mynd 4.6: Neðri hluti ásvindmyllunnar.

Kafli 5

Mælitækin

Megin markmið þessa verkefnis er að komast að því hvað vindmyllan skilar miklu affi við ákveðinn vindstyrk. Til að komast að niðurstöðu þarf að liggja fyrir hvað vindmyllan snýst marga snúninga á mínútu. Einnig þarf vægi vindmyllunnar við þann snúningshraða að vera ljóst. Þá þarf vindhraði, þegar mælingar fara fram, að vera þekktur.

5.1 Vindgöng

Þegar að vindgöng skólans voru smíðuð voru þau hönnuð þannig að til að stilla vindhraða þeirra þurfti eingöngu að stilla tíðni viftunnar sem knýr fram tiltekinn vindhraða. Tíðni mótorsins er frá 0-50 Hz þar sem 0 Hz eru 0 metrar á sekúndu og 50 Hz eru 30 metrar á sekúndu. Þar á milli er svo línulegt samband, eins og sést í viðauka C, það er að segja í 25 Hz er vindhraðinn 15 metrar á sekúndu og við 50 Hz er vindhraðinn 30 m/s. Upprunalega stóð ekki til að nota vindgöngin en eftir því sem leið á verkefnið kom í ljós að það gæti verið hentugt að nota þau þar sem vindur úti í náttúrunni er sjaldnast eða aldrei stöðugur og því getur verið erfitt að taka mælingar utandyra. Þar sem vindgöngin eru drifin áfram af viftu þá er vindurinn í þeim tiltölulega stöðugur og töluvert auðveldara er að taka mælingar í þeim. Þrátt fyrir það þá gefa þær mælingar ekki rétta mynd af þeim krafti sem vindmyllan afkastar því vindstrengurinn í göngunum er aðeins um $600mm \cdot 600mm$ [18], en vindmyllan sjálf er $400mm \cdot 1200mm$ og nær því vindstrengurinn ekki yfir alla vindmylluna.



Mynd 5.1: Hér er búið að koma vindmyllunni fyrir í vindgöngum skólans.

5.2 Snúningshraðamælir

Skýrsluhöfundur hafði samband við Indriða S. Ríkharðsson, kennara við Háskólann í Reykjavík, í þeim tilgangi að kanna hvort skólinn ætti nákvæman snúningshraðamæli sem hægt væri að fá lánaðan í þetta verkefni. Skólinn hafði þá nýlega fjárfest í góðum mæli sem hentaði vel og var honum komið fyrir á fæti myllunnar. Með mælinum fylgir endurskin, sem var komið fyrir á öxli vindmyllunnar, en nemi á mælinum nemur snúning myllunnar í hvert skipti sem endurskinið fer fram hjá honum. Mælirinn mælir frá 60 snúningum og upp að 99999 snúningum á mínútu. Vandamál skapaðist þegar að myllan snerist hægar en 60 snúninga á mínútu en þá var brugðið á það ráð að stilla mælinn á talningu snúninga (e. count) og snúningar taldir á hverri mínútu sem mæld var með skeiðklukku og út frá því var snúningshraðinn reiknaður.



Mynd 5.2: Snúningshraðamæli komið fyrir á fæti vindmyllunnar.

5.3 Kraftvog

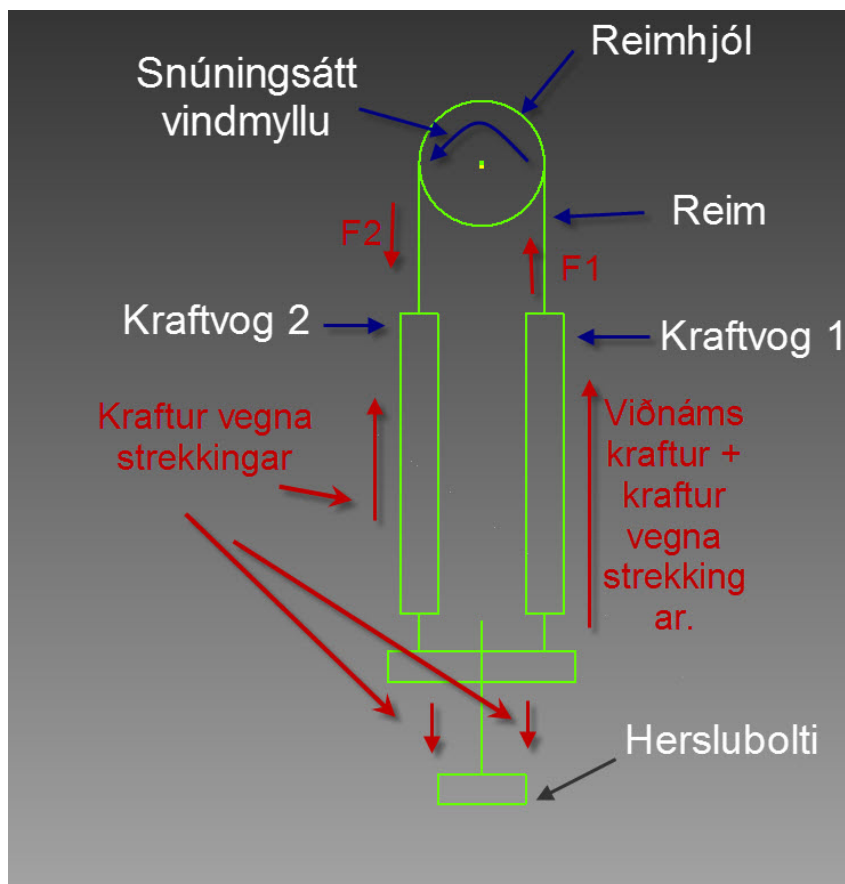
Til að geta reiknað aflið sem vindmyllan gefur þarf fyrst að reikna út vægi hennar en til þess var ákveðið að nota einfalda vog sem Háskólinn í Reykjavík á. Vogin var upprunalega á vatnshjól sem staðsett er á orkustofu skólans, var hún notuð til að mæla vægi hjóls. Á hjólið bunaði ákveðið magn af vatni og var tilgangur tilraunarinnar að finna vægi hjólsins miðað við ákveðið vatnsrennsli, og síðar reikna aflið. Þetta mælitæki var fært yfir á vindmylluna og útbúið nýtt hjól sem passaði neðan á hana.

Mælitækið virkar þannig að reim er sett utan um reimhjól sem er undir vindmyllunni og snýst með henni. Reimin festist svo í tvær vogir og á þeim er kvarði sem sýnir með hve miklum krafti er togað í þær, og er sá kvarði í kílógrömmum.



Mynd 5.3: Kraftvog komið fyrir á myllunni.

Á kraftvog 1 kemur viðnámskrafturinn fram, en draga þarf kraftinn sem kemur fram á kraftvog 2 frá kraftinum sem kemur fram á kraftvog 1 til að komast að því vægi sem þarf til að stöðva vindmylluna. Ástæðan fyrir því að notast er við tvær vogir, frekar en eina, er sú að þegar hersluboltinn er hertur, og þar af leiðandi strekkt á reiminni, þá myndast viðnámskraftur í kraftvog 1. Krafturinn í kraftvog 2 minnkar þegar hjólið fer að snúast svo hlutfall jöfnu 5.3 haldist þau sömu. Það er að segja þegar strekkt er á reiminni þá eykst summa kraftanna og er alltaf jöfn strekki kraftinum en mismunur þeirra eykst einnig en ekki í jöfnum hlutföllum. Hemlunarvægið eykst því mun meira en aukning á strekki kraftinum.



Mynd 5.4: Kraftamynd af kraftvoginni.

Vægi á hjól

$$T = F_1 \cdot r - F_2 \cdot r = (F_1 - F_2) \cdot r \quad [Nm] \quad (5.1)$$

Strekki kraftur reimar

$$F_S = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad [N] \quad (5.2)$$

Þegar reimhjólið er stopp þá er $F_1 = F_2$.

$$F_1 = F_2 \cdot e^{f \cdot \pi} \quad [N] \quad (5.3)$$

Þar sem π er snertihorn, eða hálfur hringur ($\frac{2 \cdot \pi}{2}$) eins og í þessu tilfalli. f er núningsstuðull [19].

5.4 Vindhraðamælir og Veðurstöð Íslands

Mjög mikilvægt er að ljóst sé hvað vindmyllan gefur mikið afl við ákveðinn vindhraða og því þarf að liggja fyrir hver vindhraðinn er þegar mælingar á vægi fara fram. Háskólinn í Reykjavík á mjög nákvæman vindhraðamæli sem notaður var þegar vindgöng skólans voru kvörðuð. Sá mælir er afar nákvæmur en jafnframt mjög viðkvæmur og má hann ekki blotna og því var ákveðið að nota hann ekki.

Keyptur var einfaldur vindhraðamælir sem var talinn hentugur í þetta verkefni. Hann mælir vind frá 1 m/s og upp að 30 m/s með nákvæmni upp á 0.1 m/s. Til að athuga áreiðanleika hans var farið með hann niður í vindgöng skólans og vindgöngin keyrð upp í ákveðinn vindhraða. Niðurstaðan var sú að vindgöngunum og vindhraðamælinum bar saman um vindhraða. Ástæðan fyrir því að farið var með vindmylluna austur í Þykkvabæ var sú að þar er oft vindasamt en einnig sú að þar er staðsett veðurathugunarstöð frá Veðurstofu Íslands. Haft var samband við veðurstofuna til að fá tölur um vindhraða síðastliðin ár. Út frá þeim vindmælingum er hægt að sjá meðalvindhraða og fleiri tölur sem koma til með að nýtast vel við gerð þessarar skýrslu. Taka verður tillit til þess að samkvæmt Veðurstofu Íslands þá er þeirra vindhraðamælir í 10 metra hæð yfir sjávarmáli og má áætla að sá staður sem vindmyllan komi til með að vera á sé í um 3 metra hæð yfir sjávarmáli. Því er hæðarmismunurinn 7 metrar og fer vindur vaxandi með hæð og því getur verið munur á þeim tölum sem fást hjá Veðurstofu Íslands og þeim niðurstöðum sem skýrsluhöfundur kemst að með umræddum vindhraðamæli.



Mynd 5.5: Vindhraðamælir.

Kafli 6

Fræðin við nýtingu vindorku

6.1 Mesta fræðilega afl vindorkunnar

Reglulega heyrast fréttir erlendis frá af því þegar heilu húsin fjúka á haf út vegna storma sem fara yfir stór landsvæði. Á Íslandi þekkist það varla en töluvert er um að lausir hlutir fari á flug, heilu húspökin flettist af húsum og bílar fjúki út af vegum landsins. Augljóslega er því mikil orka sem býr í vindinum.

Það afl (P) sem vindurinn afkastar á hraðanum (V) með eðlisþyngdina (ρ) í gegnum flatarmálið (A) er

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6.1)$$

Afl vindsins er í réttu hlutfalli við hálfu eðlisþyngd loftsins, flatarmálsins sem vindurinn fer í gegnum A , og vindhraðans í þriðja veldi. Til að átta sig á því hvers vegna vindhraðinn vex í þriðja veldi þá er hægt að ímynda sér að afl vindsins sé í raun hreyfiorka

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (6.2)$$

Þar sem m er þyngd loftsins sem fer í gegnum flatarmál A á hverri tímaeiningu, eða sem massastreymi

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot V \quad (6.3)$$

Þá er hægt að leiða út jöfnu 6.1 sem gefur mesta mögulega afl vindsins

$$P_{wind} = \dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V^2 \quad (6.4)$$

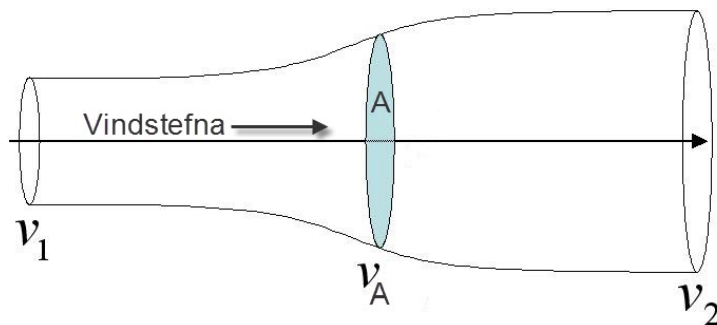
$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Jafna 6.1 gefur aflið ef vindurinn myndi stoppa alveg á flatarmálinu A, eða á spöðum vindmyllunnar en svo er ekki raunin því ef vindurinn myndi stoppa við þverskurðarflatarmálið A þá kæmist ekki „nýr“ vindur að og því engin snúningur á vindmyllunni. Ef vindurinn myndi hins vegar fá að flæða í gegnum flatarmál A án þess að hraðinn myndi minnka eftir flatarmál A þá væri ekkert afl tekið út úr vindinum. Á milli þessara tilfella er því besta lausnin til að ná sem mestu afli út úr vindinum og er það gert með því að draga úr hraðanum á vindinum eftir að hafa farið í gegnum þverskurðarflatarmál A [20].

6.1.1 Betz lögmálið

Það var árið 1926 sem Albert Betz komst að þeirri niðurstöðu að aðeins væri hægt að nýta 59 % eða 16/27 af vindorkunni til orkuframleiðslu.

Til að ná hámarksafli, samkvæmt Betz, út úr vindinum þá þarf vindmyllan að vera hönnuð þannig að loftið sem kemur að vindmyllunni sé á hraðanum V_1 , þegar loftið fer frá vindmyllunni þarf það að vera á hraðanum V_2 í því hlutfalli sem sést í formúlu 6.5.



Mynd 6.1: Vindur sem fer í gegnum þverskurðarflatarmál A með hraðanum V. [21]

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot V_1 \quad (6.5)$$

Þá er vindhraðinn í þverskurðarflatarmálinu A

$$V_A = \frac{2}{3} \cdot V_1 \quad (6.6)$$

Jafna 6.7 lýsir því fræðilega mesta afli sem hægt er að taka út úr vindinum samkvæmt Betz.

$$P_{Betz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_{P,Betz} \quad (6.7)$$

Þar sem $C_{P,Betz}$ er afstuðull Betz, eða 0.59 [7].

6.1.2 Afl Persian og Savonius vindmylla

Fyrir vindmyllur sem nota viðnámskraft sem drifkraft þá er afstæði hraðinn, w (e. relative velocity) reiknaður út frá vindhraðanum v og margfeldi hornhraða og radíus frá miðju vindmyllunnar að miðju blaðsins, u (e. blade tip speed).

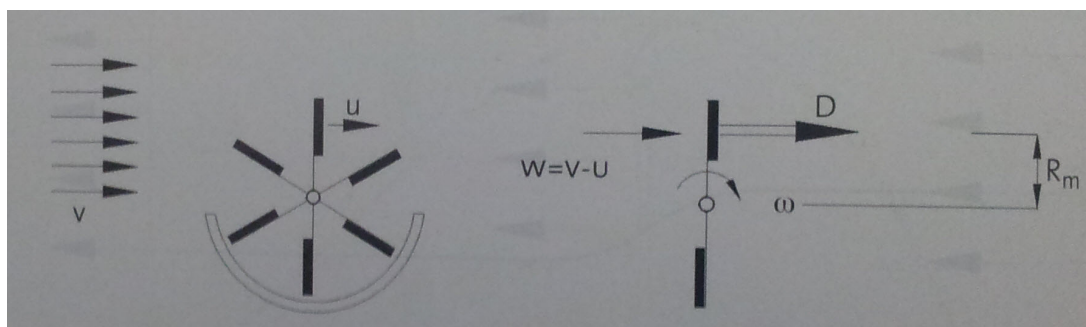
$$u = \omega * R_m \quad [m/s] \quad (6.8)$$

$$w = v - u \quad [m/s] \quad (6.9)$$

Út frá formúlu 6.9 sést því að afstæði vindhraðinn, w , nær aldrei hraða vindsins, v .

6.1.2.1 Persian vindmyllur

Á mynd 6.2 sést hvernig vindurinn lendir einungins á þeim spöðum sem sjá um að snúa vindmyllunni en ekki á þeim sem vinna á móti snúningnum. Því þarf ekki að gera ráð fyrir mótstöðukraftinum í útreikningum á heildarafli Persian vindmyllunnar.



Mynd 6.2: Uppbygging Persian vindmylla.
[7]

Aflið sem Persian vindmyllur geta afkastað er

$$P = F \cdot u = C_D \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v - u)^2 \cdot u \quad (6.10)$$

Þar sem hámarksafl fæst við

$$\frac{dp}{dv} = 0 \quad (6.11)$$

þá fæst að

$$u = \frac{1}{3} \cdot v \quad (6.12)$$

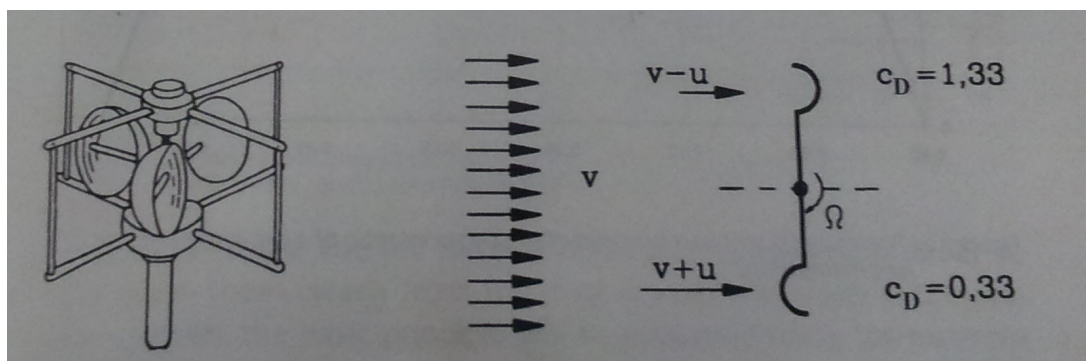
Því er fræðilegt hámarksafl Persian vindmyllunnar [22]

$$P_{max} = \frac{4}{27} \cdot C_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \quad (6.13)$$

6.1.2.2 Savonius vindmyllur

Ásvindmyllan byggist, líkt og áður segir, á hönnun Savonius vindmyllunnar.

Eins og sést á mynd 6.3 þá blæs vindurinn á alla vindmylluna ólíkt Persian vindmyllunni. Því þarf að reikna þann kraft, sem verkar á þá hlið vindmyllunnar sem ekki er að taka á sig vind til að snúa henni, heldur virkar sem viðnám, $P_{D.sl}$. Aflið sem sér um að snúa vindmyllunni, $P_{D.dr}$, reiknast eins og afl Persian vindmyllunnar.



Mynd 6.3: Virkni Savonius vindmylla.

[7]

Eins og sést á mynd 6.3 þá er afstæði hraðinn mismunandi. Sá helmingur vindmyllunnar sem tekur á sig vind til að snúa henni hefur afstæða hraðann $w = v - u$, en sá helmingur sem virkar sem viðnám á vindmylluna hefur afstæða hraðann $w = v + u$. Ástæðan fyrir því er sú að vindurinn er að fara á móti snúningsátt vindmyllunnar.

Viðnámskrafturinn sem virkar á þá skál sem snýr vindmyllunni er

$$D_{dr} = C_{D1} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v - u)^2 \quad (6.14)$$

Viðnámskrafturinn sem virkar á skálina sem er viðnám á snúning vindmyllunnar er

$$D_{sl} = C_{D2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v + u)^2 \quad (6.15)$$

Aflið er síðan reiknað með því að margfalda kraftinn með hraða blaðanna, u

$$P = F \cdot u = (D_{dr} - D_{sl}) \cdot u \quad (6.16)$$

Samkvæmt viðauka I reiknast afl Savonius vindmyllunnar á eftirfarandi hátt

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \cdot (\lambda^2 - 3.6 \cdot \lambda + 1) \cdot \lambda \quad (6.17)$$

Þar sem

$$C_P = (\lambda^2 - 3.6 \cdot \lambda + 1) \cdot \lambda \quad (6.18)$$

og

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega \cdot R_m}{v} \quad (6.19)$$

Til að sjá við hvaða afstuðul, C_P , mesta mögulega aflið fæst úr Savonis vindmyllu

$$\frac{dC_P}{d\lambda} = 0 \quad (6.20)$$

$$(\lambda^2 - 3.6 \cdot \lambda + 1) \cdot 1 + (2 \cdot \lambda - 3.6) \cdot \lambda = 0 \quad (6.21)$$

$$3 \cdot \lambda^2 - 7.2 \cdot \lambda + 1 = 0 \quad (6.22)$$

$$\lambda = \frac{7.2 \pm \sqrt{7.2^2 - 4 \cdot 3 \cdot 1}}{2 \cdot 3} = \frac{7.2 \pm 6.31}{6} \quad (6.23)$$

λ er því annað hvort 2.25 eða 0.1483 og er C_{Pmax} við $\lambda = 0.1483$.

Út frá því fæst að

$$C_{Pmax} = 0.1483 \cdot (0.1483^2 - 3.6 \cdot 0.1483 + 1) = 0.072 \quad (6.24)$$

Sem þýðir að aðeins 7.2 % af afli vindsins nýtist til orkuframleiðslu í Savonius vindmyllum.

Því er afstuðullinn skilgreindur út frá hlutfallinu milli fræðilegs afis í vindinum, P_0 , og þess afis sem tekið er út úr vindinum, P_D

$$C_P = \frac{P_D}{P_0} = \frac{P_D}{P_{wind}} \quad (6.25)$$

Afl Savonius vindmylla reiknast því samkvæmt formúlu 6.10

$$P_{heild} = P_{D.dr} - P_{D.sl} \quad (6.26)$$

$$P_{heild} = C_{D1} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v - u)^2 \cdot u - C_{D2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v + u)^2 \cdot u \quad (6.27)$$

Þar sem C_{D1} er viðnámsstuðull fyrir það yfirborð sem knýr vindmylluna áfram og C_{D2} er viðnámsstuðull fyrir yfirborðið sem virkar sem viðnám á vindmylluna. A er flatarmál þess hlutar sem vindurinn lendir á og knýr fram snúning, hvort sem hann er til að snúa vindmyllunni eða verka sem viðnám [22].

Kafli 7

Mælingar og úrvinnsla

Þar sem höfundur þessarar skýrslu fékk vindmylluna upp í hendurnar án þess að vita fyrir hversu miklu afli hún gæti skilað þá þurfti að framkvæma nokkrar mælingar til að komast að því.

Háskólinn í Reykjavík hefur unnið við rannsóknir á ómönnuðum farartækjum, þar á meðal ómannaðs vélfugls en ráðist var í að smíða vindgöng fyrir mælingar á vélfuglinum og hinum ýmsu verkefnum. Haft var samband við Leif Þór Leifsson, lektor við Háskólann í Reykjavík og umsjónarmann vindganganna, og fengið leyfi til að framkvæma mælingar í göngunum. Hluti verkefnisins var að komast að því hvort að línulegt samband væri á milli þess hve mikið afl vindmyllan gefur og á hve stóran hluta vindmyllunnar vindurinn verkar á. Þá var ljóst að framkvæma þyrfti mælingar bæði í vindgöngunum og utandyra þar sem mælingar í vindgöngum voru takmarkaðar við það flatarmál sem vindstrengurinn náði yfir.

7.1 Framkvæmd mælinga í vindgöngum

Eftir að búið var að koma vindmyllunni fyrir í vindgöngunum var hafist handa við að taka mælingar. Eins og áður kom fram þá eru vindgöngin byggð þannig að vindstrengurinn sem nýtist er aðeins $600\text{mm} \cdot 600\text{mm}$ í flatarmál [18] og því nær hann ekki yfir alla vindmylluna en flatarmál skóflanna er 1200 mm á hæð og 400 mm á breidd. Því blása göngin aðeins á um helming af hæð vindmyllunnar. Snúningshraði vindmyllunnar var mældur við mismunandi vindhraða, sem stilltur var með því að auka við tíðni viftunnar sem framkallar vindhraðann. Hámarksvindhraði sem vindgöngin geta afkastað eru 30 m/s við 50 Hz. Samkvæmt skýrslu sem gerð var við smíði vindganganna er uppgefinn vindhraði, samkvæmt viðauka C, í miðjunni á vindgöngunum og því var ásvindmyllunni komið fyrir þar [18].

7.2 Niðurstöður mælinga í vindgöngum

Snúningshraði vindmyllunnar skiptir höfuðmáli hvað varðar afkastagetu á afli, þá skiptir snúningshraði vindmyllunnar einnig miklu máli þegar kemur að smíðinni, val á legum, styrkingum og fleiru. Því var ákveðið að athuga hver snúningshraði vindmyllunnar væri við ekkert álag, það er að segja bremsan, eða kraftvogin, var ekki tengd við vindmylluna meðan á þessum mælingum stóð. Ekki var unnt að sjá snúningshraðann fyrir lægri vindstyrk en 7.8 m/s því það var sá vindstyrkur sem þurfti til að koma vindmyllunni af stað. Kom það nokkuð á óvart hve mikill snúningshraði vindmyllunnar var og þá sérstaklega við mikinn vindstyrk. Sem dæmi má nefna að snúningshraði vindmyllunnar var 673 snúningar á mínútu við 20 m/s og 1086 snúningar á mínútu við 30 m/s.

Til að fá nákvæm og góð gildi á snúningshraðann voru mælingarnar framkvæmdar þrisvar sinnum og var lítil sem engin skekkja í niðurstöðunum eins og sést í viðauka B.

7.2.1 Lámarsvindhraði ásvindmyllunnar í vindgöngunum

Þar sem ákveðið viðnám er í legum vindmyllunnar þá þarf ákveðinn vindhraða til að yfirvinna það viðnám og sýndi ein af mælingunum í vindgöngunum fram á að það þyrfti að meðaltali 7.85 m/s svo að vindmyllan færi af stað. Þessi mæling var framkvæmd þannig að vindhraðinn í göngunum var keyrður hægt upp þangað til vindmyllan fór að snúast. Þessi mæling var framkvæmd 7 sinnum til að fá nákvæma niðurstöðu eins og sjá má í viðauka A.

Nauðsynlegt er að vita hvaða lámarsvindhraða þarf svo að vindmyllan byrji að snúast því misjafnt er, eftir landshlutum og svæðum, hver meðalvindhraði yfir árstímabil er. Vindmyllan þarf að byrja að snúast við sem lægstan vindstyrk.

7.2.2 Eigintíðni og óstöðugleiki

Þegar búið var að koma vindmyllunni fyrir í vindgöngunum og prófað var að keyra vindhraðann upp, komu í ljós eigintíðnir vindmyllunnar. Þegar vindhraðinn í göngunum var keyrður upp í 12 m/s var snúningshraðinn á vindmyllunni um 320 snúningar á mínútu og fór hún að hristast en varð svo stöðug þegar aukið var við vindhraðann. Þegar vindhraðinn var aukinn upp í 18 m/s hristist vindmyllan töluvert meira og dansaði hún á gólfinu og var því ekki hægt að taka mælingar í þeim vindhraða. Samkvæmt viðauka B þá er snúningshraði vindmyllunnar í 18 m/s, á milli 530 og 633 snúninga á mínútu án álags. Í öllum mælingum var því farið snögglega yfir 18 m/s til að komast yfir óstöðugleikann. Þó svo að vindmyllan hafi nokkrar eigintíðnir þá er annar þáttur sem hefur áhrif á sveiflur hennar þegar hún nær ákveðnum snúningshraða og er það smíði hennar.

Spaðarnir, eða skóflurnar, sem taka á sig vind eru ekki nákvæmlega smíðaðar. Einnig var erfitt að ná rörinu sem skóflurnar ganga upp á alveg beinu og því sveiflast það aðeins til í hverjum hring. Til að finna eigintíðnir vindmyllunnar var gerð greining í forritinu Ansys Workbench.

7.2.2.1 Eigintíðnir fundnar með Ansys greiningu

Til að komast að því hverjar eigintíðnir vindmyllunnar eru þá var framkvæmd greining í forritinu Ansys Workbench. Nokkur vandamál komu upp við gerð greiningarinnar og ber þar helst að nefna að forritið réð ekki við fjölda eininga (e. element), en forritið skiptir vindmyllunni niður í margar litlar einingar áður en greiningin fer fram og má fjöldi þeirra ekki fara yfir 256 þúsund. Þá var brugðið á það ráð að breyta öllum þunnum pörtum í svokallað skeljalíkan (e. shell model) og þannig fækka einingum.

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	21,881
2	2,	21,988
3	3,	28,476
4	4,	29,428
5	5,	36,121
6	6,	37,532

Mynd 7.1: Eigintíðnir ásvindmyllunnar.

Eins og sjá má á mynd 7.1 þá er lægsta eigintíðni ásvindmyllunnar 21,8 Hz. Ef miðað er við að einn snúningur á sekúndu sé 1 Hz, þá er 21,8 Hz um það bil 1308 snúningar á mínútu. Við þá tíðni fara járnrorin að bogna eins og sjá má í viðauka J.

Þessi greining gefur ágæta mynd af fyrstu sex eigintíðnum vindmyllunnar þó svo að forritið geti ekki greint líkanið fullkomlega rétt. Ástæðan fyrir því er sú að forritið reiknar líkanið þannig að samsetningar milli leganna, sem eru í vindmyllunni, og þeirra parta sem þær liggja að, eru algerlega stífar og virka eins og legurnar séu soðnar á þann stað sem þær eru á, þó að svo sé ekki.

7.2.3 Afl vindmyllunnar

Líkt og áður segir er megin markmið þessa verkefnis að finna út hvað þessi tegund vindmyllu, með þessa lögun blaða, getur afkastað miklu afli. Eins og áður hefur komið fram þá blés vindur á um helming vindmyllunnar í vindgöngunum og þótti skýrsluhöfundur fróðlegt að bera þær niðurstöður við niðurstöður prófana utandyra.

Eins og kom fram hér að ofan þá var snúningshraði vindmyllunnar mældur við ekkert álag og fastan vindhraða. Til að fá vægiskúrvu fyrir hvern vindhraða fyrir sig þá var kraftvogin notuð til að sjá hve mikið snúningshraði vindmyllunnar lækkaði við ákveðið álag. Út frá niðurstöðum þessa mælinga er hægt að reikna afl vindmyllunnar.

Byrja þarf að umreikna þau kílógrömm sem kraftvogin sýnir yfir í kraft.

$$F = kg * g \quad [N] \quad (7.1)$$

Þar sem kg eru lesin af hvorri kraftvog fyrir sig og g er þyngdarhröðun jarðar, eða $9,82 \text{ m/s}^2$.

Þá er hægt að reikna vægi(T) vindmyllunnar.

$$T = (F_1 - F_2) * r \quad [Nm] \quad (7.2)$$

Þar sem r er radíus reimhjólans sem bremsað er, F_1 er kraftur sem kraftvog 1 gefur og F_2 er kraftur sem kraftvog 2 gefur. Sjá mynd 5.4.

Til að reikna afl vindmyllunnar þá þarf fyrst að reikna hornhraða hennar:

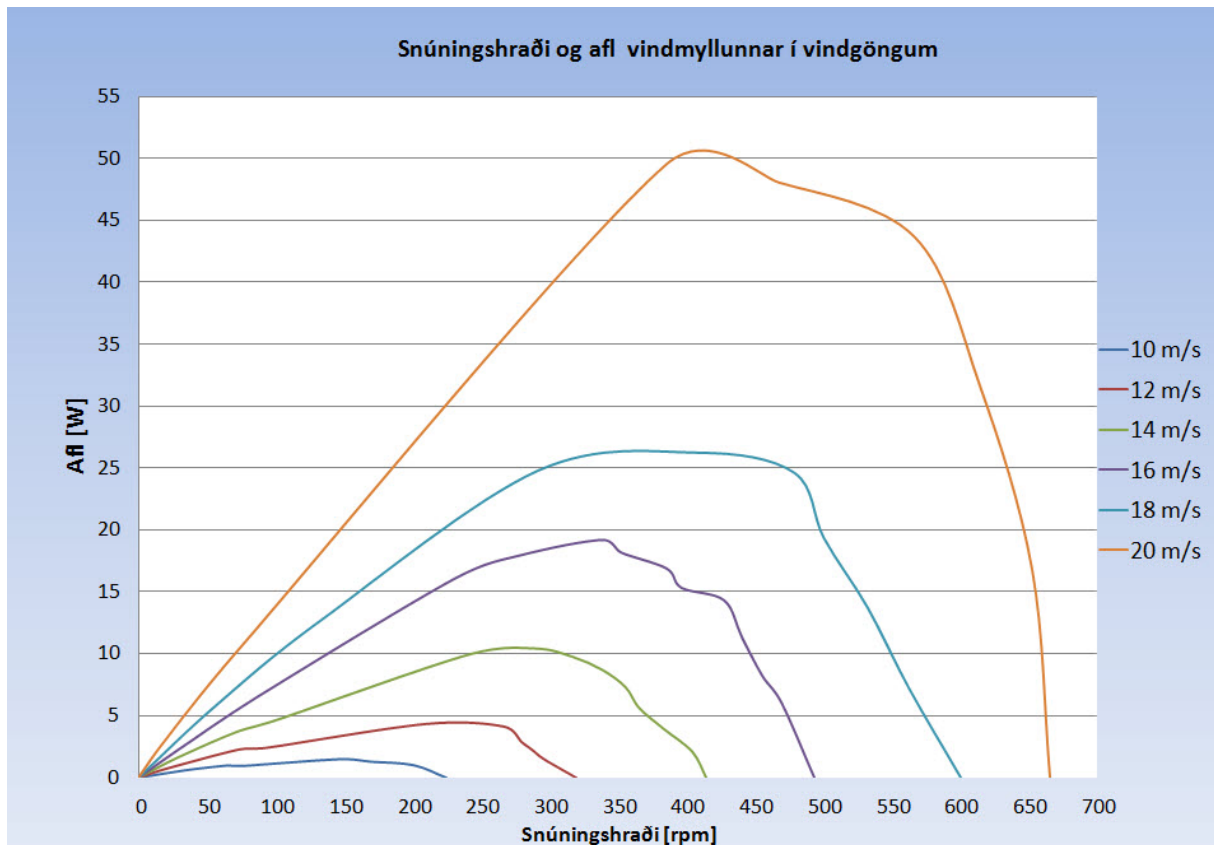
$$\omega = 2\pi * \frac{n}{60} \quad [rad/sek] \quad (7.3)$$

Þar sem n eru snúningar vindmyllunnar í snúningum á mínútu.

Að lokum er því hægt að reikna afl vindmyllunnar:

$$P = T * \omega \quad [W] \quad (7.4)$$

Á mynd 7.2 sést hvað afl vindmyllunnar var við valin gildi á vindhraða. Ákveðið var að taka nákvæmar mælingar á eftirtöldum vindhröðum, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 18 m/s og 20 m/s. Ástæðan fyrir þessu vali var sú að þessi gildi á vindstyrk eru tíð á Íslandi. Margar vindmyllur byrja ekki að framleiða rafmang fyrr en í 10 m/s og slá svo út í 20 m/s eða hætta að framleiða rafmagn og því er hægt að bera þessar niðurstöður við þær vindmyllur [19].



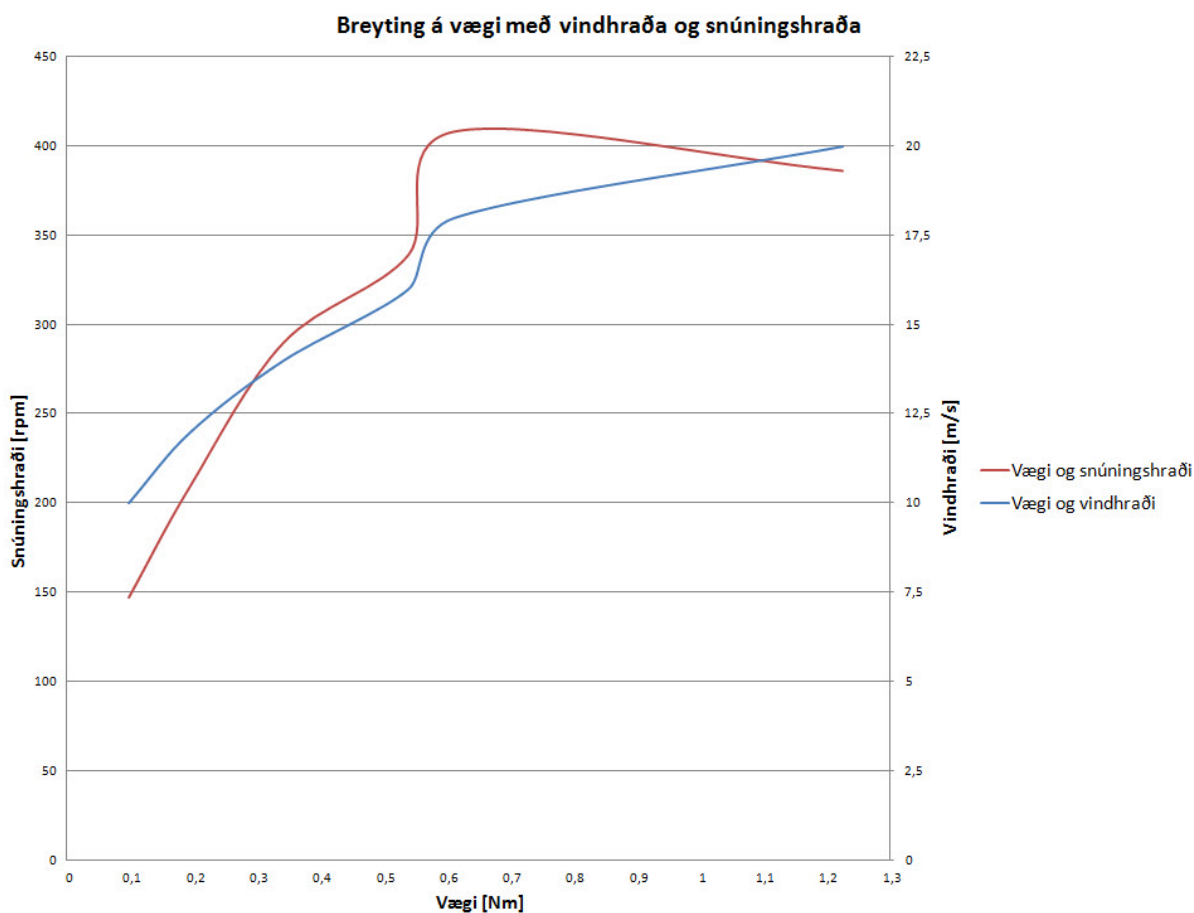
Mynd 7.2: Afl vindmyllunnar í vindgöngunum.

Í töflu 7.1 er búið að taka saman hámarksafl sem vindmyllan getur afkastað í vindgöngunum þar sem vindurinn blæs aðeins yfir um helming vindmyllunnar.

Vindhraði [m/s]	Afl [W]	Vægi [Nm]	Snúningur [rpm]
10	1,5	0,098	147
12	4,3	0,196	210
14	10,4	0,343	290
16	19,2	0,54	339
18	26,2	0,613	408
20	49,6	1,226	386

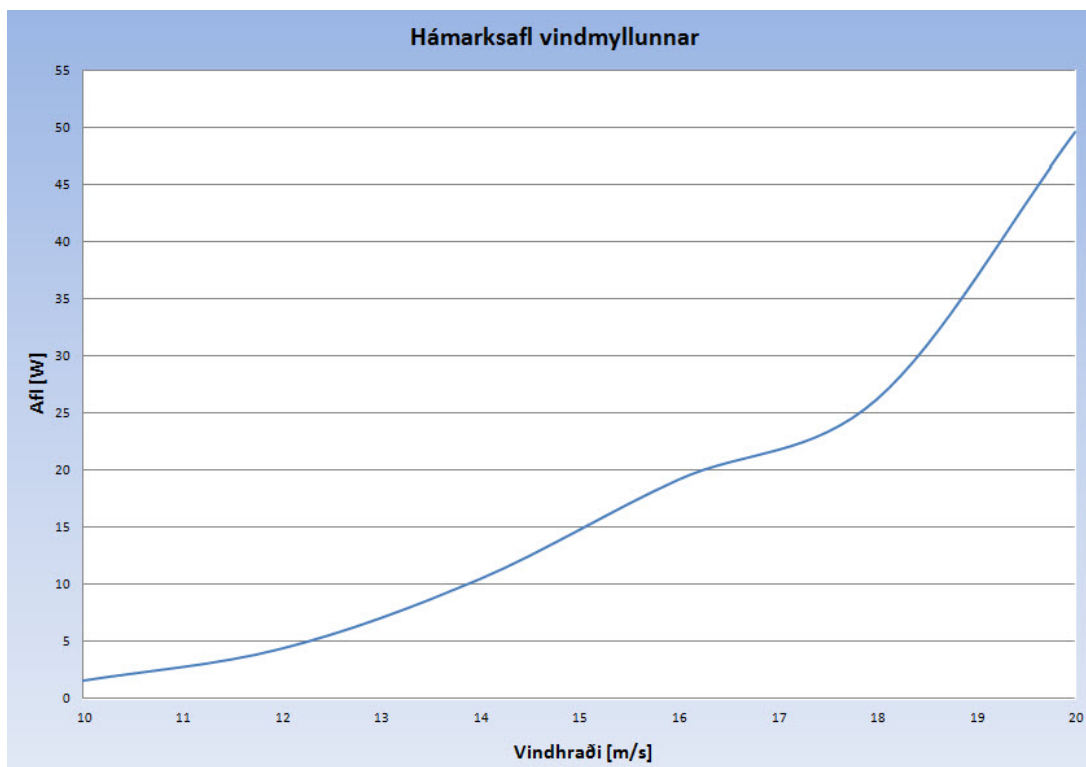
Tafla 7.1: Hámarksafl vindmyllunnar við ákveðið vægi í vindgöngum.

Á mynd 7.3 sést hvernig hámarksvægi vindmyllunnar breytist með tilliti til snúningshraða og vindhraða. Ef rauði ferillinn fyrir snúningshraða og vægi er skoðaður þá kemur í ljós að þrátt fyrir að vindmyllan gefi meira vægi við 20 m/s þá er það við minni snúningshraða heldur en í 18 m/s. Möguleg ástæða þess er sú að vindmyllan er farin að snúast það hratt við 20 m/s og hraðinn u , sem er margfeldi hornhraðans og rásins frá miðju vindmyllunnar að miðju vindmyllublaðsins R_m , er að nálgast vindhraðann og því lækkar snúningshraðinn þegar vindstyrkurinn er orðinn svona mikill.



Mynd 7.3: Breyting á vægi með vindhraða og snúningshraða.

Mynd 7.4 sýnir hversu mikið hámarksafl vindmyllunnar eykst við aukinn vindhraða í vindgöngum skólans. Þar sem afl vindmyllunnar eykst með vindhraðanum í þriðja veldi samkvæmt jöfnu 6.17, þá eykst afkastageta vindmyllunnar hratt með auknum vindhraða.



Mynd 7.4: Hámarksafl vindmyllunnar í vindgöngum.

7.2.4 Öryggi

Ef aðstæður hefðu leyft þá hefði verið hægt að stífa vindmylluna niður og festa fætur hennar en þar sem aðstaðan er frekar takmörkuð í vindgöngunum þá var ekki hægt að festa mylluna öðruvísi en að setja þyngingar á fætur hennar. Dró það úr óstöðugleika vindmyllunnar en þegar komið var upp fyrir 25 m/s var vindmyllan aftur orðin óstöðug og erfitt og jafnvel hættulegt að taka mælingar inni í göngunum. Skýrsluhöfundur fylgdi ávallt þeim öryggiskröfum sem ber að fylgja við umgengni vindganganna, en nauðsynlegt er að vera með eyrnahlífar og hlífðarglæraugu þegar taka á mælingar og vindgöngin í gangi.

7.3 Framkvæmd mælinga og uppsetning í Þykkvabæ

7.3.1 Uppsetning vindmyllunnar

Eftir að mælingum var lokið í vindgöngum Háskólans í Reykjavík var vindmyllan undirbúin fyrir flutning og var hún flutt með flutningabíl austur í Þykkvabæ þar sem fyrirhugað var að taka mælingar utandyra. Byrjað var á því að útbúa stög og hæla til að festa vindmylluna kyrfilega. Skýrsluhöfundur hefur heyrt ófáar sögur af tilraunum til að framleiða rafmagn með vindmyllum en fljótlega eftir að lokið hefur verið við uppsetningu hafa þær fokið. Þó svo að umrædd ásvindmylla sé ekki stór þá verka stórir kraftar á hana og er því skynsamlegt, og jafnframt nauðsynlegt, að festa hana vel. Sagað var niður steypustyrktarjárn og útbúnir hælur. Hælarnir voru síðan reknir ofan í jörðina til að staga í. Þá voru þrír hælur reknir í gegnum fætur myllunnar til að halda henni á jörðinni en búið var að bora göt í fæturnar með það í huga. Að lokum var vindmyllan stöguð niður og hún stillt með vantstrekki þar til hún var rétt. Eftir að búið var að koma vindmyllunni fyrir, festa hana og stilla, þá var einfaldlega beðið eftir lágmarks vindstyrk. Það vildi svo óheppilega til að meðan á þessu verkefni stóð var lítill vindur á öllu landinu og því ekki hægt að taka mælingar á vindmyllunni né prófa virkni hennar utandyra, þar til í sömu viku og búið var að koma vindmyllunni fyrir í Þykkvabæ. Þá gaf Veðurstofa Íslands út stormviðvörðun og vakti það mikla lukku hjá skýrsluhöfundum.



Mynd 7.5: Uppsetningu lokið í Þykkvabæ.

7.3.2 Framkvæmd mælinga

Sömu mæliaðferðum og þeim sem notaðar voru við mælingar í Háskólanum í Reykjavík, var beitt við mælingar í Þykkvabæ. Munurinn á mælingunum var sá að utandyra er ekki hægt að stjórna vindhraðanum, eins og hægt var í vindgöngunum, og þarf því að aðlaga mælingarnar að þeim vindhraða sem er hverju sinni. Vindurinn er heldur ekki jafn stöðugur og í vindgöngunum, og gerði það mælingarnar flóknari og ónákvæmari. Bremsunni, eða kraftvoginni, var komið fyrir á fæti vindmyllunnar ásamt snúningshraðamælinum. Snúningshraði vindmyllunnar var mældur við ekkert álag, síðan var álagi bætt á vindmylluna í þrepum og snúningshraði tekinn við hvert gildi þar til vindmyllan hætti að snúast. Teknar voru þrjár mælingar á 10 mínútna fresti til þess að fá sem nákvæmastar niðurstöður. Mælingar voru framkvæmdar tvo daga, annan daginn var meðalvindhraði 10 m/s, yfir þann tíma sem mælingar fóru fram, og hinn daginn var meðalvindhraði yfir mælitímann 14 m/s.

Eins og áður hefur komið fram þá var farið með ásvindmylluna í Þykkvabæ þar sem staðsett er sjálfvirk veðurathugunarstöð frá Veðurstofu Íslands. Þar sem tiltekin veðurathugunarstöð er sjálfvirk þá er hægt að nálgast veðurgögn frá henni á heimasíðu Veðurstofunnar. Þannig er hægt að fylgjast með meðalvindhraða síðastliðinnar klukkustundar. Þessar upplýsingar nýtti skýrsluhöfundur sér til þess að finna út þann vindhraða sem var við hverja mælingu.

Eins og fram kemur á heimasíðu Veðurstofu Íslands þá er vindhraðamælirinn, sem mælir vindhraðann í Þykkvabæ, staðsettur í 10 metra hæð yfir sjávarmáli. Þar sem vindhraði eykst með hæð þá má áætla að vindhraðinn þar sem vindmyllan stendur sé minni en það sem veðurathugunarstöðin gaf til kynna. Til að komast að því hver vindhraðinn var við vindmylluna var vindhraðinn mældur með handvirkum vindhraðamæli sem fjallað er um í kafla 5.4. Teknar voru 20 augnabliksmælingar yfir 10 mínútna tímabil og út frá því var meðalvindhraði við vindmylluna áætlaður.

7.4 Niðurstöður mælinga í Þykkvabæ

Ef niðurstöður úr mælingunum sem framkvæmdar voru í vindgöngum skólans eru skoðaðar þá sést að aflið sem vindmyllan skilar er ekki mikið, aðeins nokkur wött. Eftir að hafa skoðað þær niðurstöður þá gerði skýrsluhöfundur sér grein fyrir því hve lítið afl vindmyllan gæti framleitt þegar búið væri að koma henni fyrir úti í náttúrunni.

7.4.1 Veðurgögn

Leitað var til Veðurstofu Íslands og athugað hvort möguleiki væri á að fá veðurgögn úr veðurathugunarstöðinni í Þykkvabæ til að skoða hvernig vindurinn hefur hagað sér síðustu ár á því svæði. Skýrsluhöfundur hafði samband við Trausta Jónsson hjá Veðurstofunni og útvegaði hann upplýsingar um vindhraða í Þykkvabænum frá því árið 2006. Mjög mikilvægt er að skoða meðalvindhraða yfir langt tímabil til að skoða hvort raunhæft sé að hefja vindmyllurekstur á athugunarsvæðinu.

Frá því í byrjun ársins 2006 og þangað til 28.8.2012 þá var meðalvindhraði í Þykkvabæ, samkvæmt viðauka H, 5,8 m/s. Miðað er við að vindmyllan sem fjallað er um í þessari skýrslu byrji að snúast við meðalvindhraðann 6 m/s úti í náttúrunni.

Daginn sem vindmyllan var sett upp var vindhraðinn 5 m/s og náði vindhraðinn 7 m/s í hviðum. Í 5 m/s snerist vindmyllan ekki en hún byrjaði að snúast við litlar vindhviður og því var áætlað að nauðsynlegur vindhraði væri um 6 m/s. Ef þær niðurstöður eru bornar saman við þær niðurstöður sem fengust úr mælingunum í vindgöngunum þá ber því ágætlega saman en vindmyllan byrjaði að snúast við 7.8 m/s í vindgöngunum.

7.4.2 Eigintíðni og óstöðugleiki

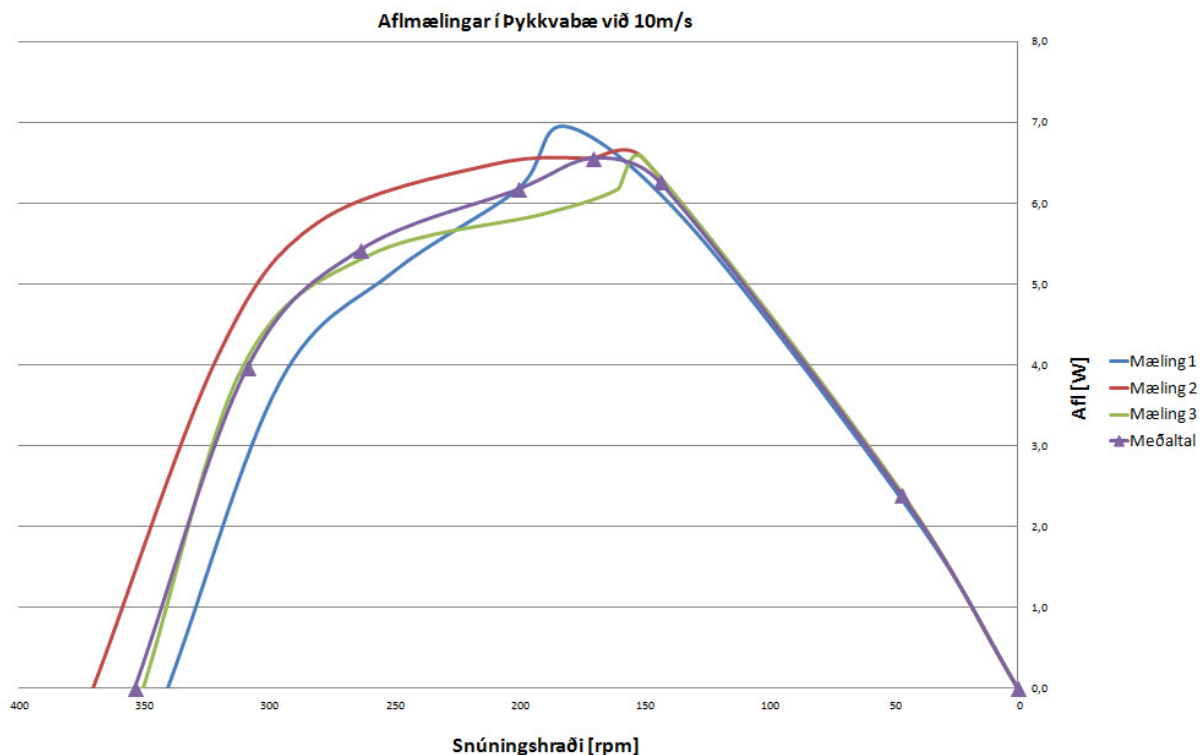
Þegar mælingar fóru fram í vindgöngum skólans þá var vindmyllan ekki stöguð eða fest niður, heldur var steinum komið fyrir á fótum hennar.

Þegar búið var að flytja vindmylluna í Þykkvabæ var hún fest kyrfilega með stögum og hælum. Þegar vindmyllan fór að snúast í vindinum kom það í ljós að lítil sem engin hreyfing var á umgjörðinni eða skóflunum sjálfum. Ástæða þess var að nú var búið að staga vindmylluna og því gat hún ekki slegist til lengur eins og hún gerði í vindgöngunum. Þar sem að smíði vindmyllunnar var ekki mjög nákvæm þá var smá sláttur á henni í hverjum snúning og má þá ætla að þar sem að umgjörð vindmyllunnar var hætt að hreyfast í hverjum snúning hafi verið erfiðara fyrir hana að snúast. Það má einnig áætla að eigintíðnir vindmyllunnar hafi breyst við það að staga hana niður.

7.4.3 Afl vindmyllunnar

Eins og fram hefur komið þá voru aðeins framkvæmdar mælingar við meðal vindhraðana 10 m/s og 14 m/s. Út frá niðurstöðunum er hægt að sjá sambandið á milli afls vindmyllunnar í vindgöngunum, þar sem vindurinn verkaði aðeins á um helming vindmyllunnar, og svo afls vindmyllunnar þegar hún var komin út. Út frá því er svo hægt að sjá hvort línulegt samband sé á milli afls vindmyllunnar og hæðar sem vindurinn verkar á. Ef svo væri þá ætti vindmyllan að skila um tvöfalt meira afli úti í náttúrunni en í vindgöngunum.

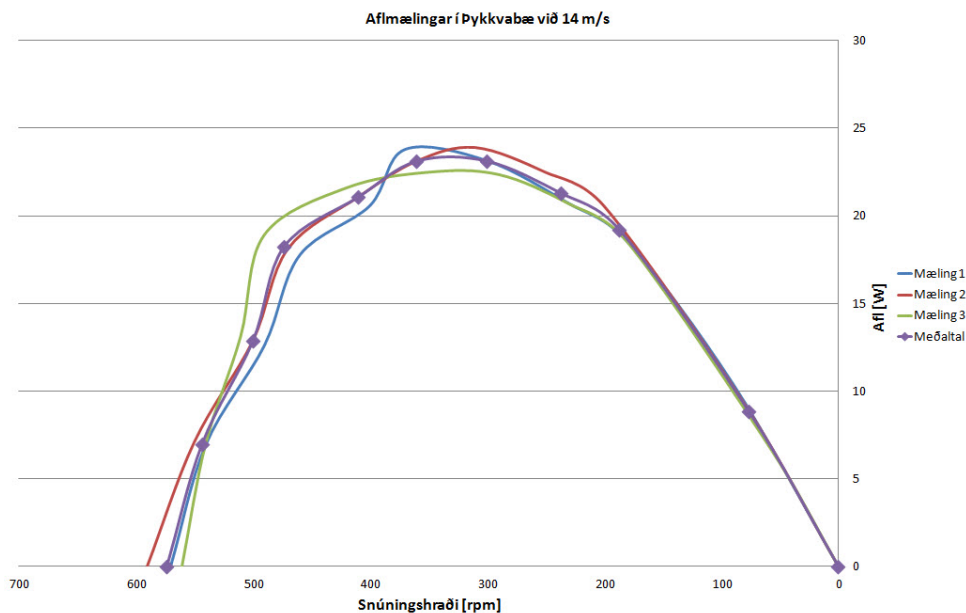
Á mynd 7.6 má sjá niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru í Þykkvabæ við meðalvindhraðann 10 m/s, tölulegar niðurstöður er að finna í viðauka E. Teknar voru 3 mælingar og meðaltal fengið út frá þeim mælingum.



Mynd 7.6: Mælingarnar 3 sem framkvæmdar voru við 10 m/s.

Eins og sést á grafinu á mynd 7.6 þá er mesta afl vindmyllunnar við 10 m/s meðalvindhraða um það bil 6,5 W.

Á mynd 7.7 eru niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru í Þykkvabæ við meðalvindhraðann 14 m/s, og má sjá tölulegar niðurstöður mælinganna í viðauka E. Teknar voru 3 mælingar og meðaltal fengið út frá þeim mælingum.



Mynd 7.7: Mælingarnar 3 sem framkvæmdar voru við 14 m/s.

Eins og sést á grafinu á mynd 7.7 þá er mesta afl sem vindmyllan getur framleitt við meðalvindhraðann 14 m/s um það bil 24 W.

7.5 Samanburður

Ef niðurstöður mælinganna eru skoðaðar þá kemur í ljós að þessi útfærsla af vindmyllu afkastar frekar litlu afli en eins og sést í töflu 7.2 þá afkastar vindmyllan tæplega 7 wöttum í Þykkvabænum við vindhraðann 10 m/s en einungis um 1,5 wöttum við sama vindhraða í vindgöngunum.

	Vindhraði [m/s]	Snúningshraði við ekkert álag [rpm]	Snúningshraði við hámarksafi [rpm]	Afl [W]
Vindgöng	10	240	147	1,52
Þykkvibær	10	353	170	6,6
Hlutfallsleg aukning.	1,00	1,47	1,16	4,34
Aukning í %	0%	47%	16%	334%

Tafla 7.2: Samanburðartafla fyrir meðal vindhraðann 10 m/s.

í töflu 7.3 eru niðurstöður mælinga á vindmyllunni við meðalvindhraðann 14 m/s, bæði í vindgöngunum og í Þykkvabænum. Eins og taflan sýnir þá afkastar vindmyllan 10,4 wöttum í vindgöngunum en þegar vindmyllan er komin út í náttúruna þá skilar hún 23 wöttum.

	Vindhraði [m/s]	Snúningshraði við ekkert álag [rpm]	Snúningshraði við hámarksafl [rpm]	Afl [W]
Vindgöng	14	290	290	10,43
Þykkvibær	14	573	330	23
Hlutfallsleg aukning	1	1,98	1,14	2,21
Aukning í %	0%	98%	14%	121%

Tafla 7.3: Samanburðartafla fyrir meðal vindhraðann 14 m/s.

Ef töflur 7.2 og 7.3 eru bornar saman þá sést að það er ekki sama hlutfallslega aukningin á snúningshraða vindmyllunnar. Þegar vindhraði er 10 m/s þá er hlutfallsleg aukning á snúningshraðanum úr mælingum í vindgöngum og svo úti í náttúrunni 47 %. Þegar sama hlutfall er skoðað fyrir vindhraðann 14 m/s þá er hlutfallið komið í 98 %, sem þýðir að snúningshraðinn nánast tvöfaldast við tiltekinn vindhraða.

Það kemur einnig á óvart að hlutfallslega aukningin á því afli sem vindmyllan afkastar er mismikil milli tafla. Þegar vindhraði er 10 m/s þá fjórfaldast aflið sem vindmyllan skilar á milli mælinga í vindgöngum og úti í náttúrunni. Þegar vindhraðinn er 14 m/s þá rúmlega tvöfaldast aflið milli mælinga.

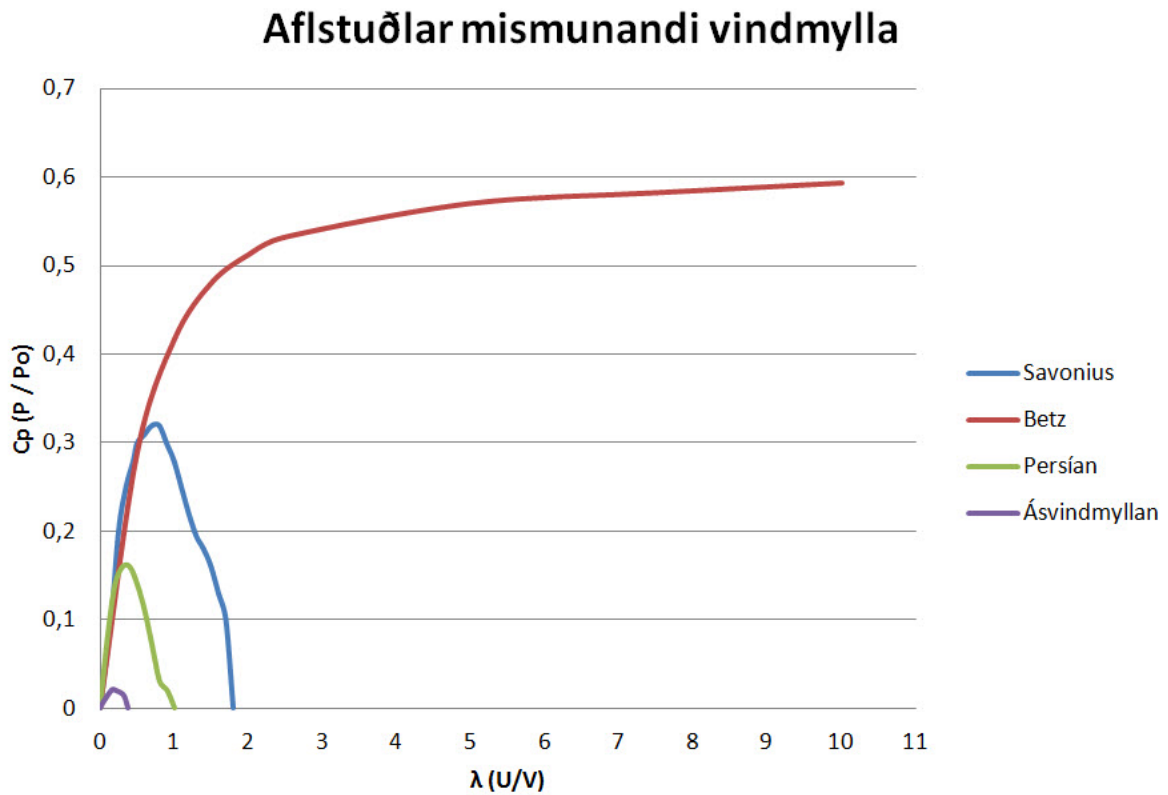
7.6 Fræðilegt afl ásvindmyllunnar

Miðað við það þverskurðarflatarmál sem vindurinn fer í gegnum, þegar hann snýr ásvindmyllunni, þá er fræðilega mesta aflið sem hægt er að ná út úr vindinum reiknað út frá formúlu 6.1, eða 300 wött. Út frá lögmáli Betz þá er hámarksnýtnin þó aðeins 59% af því, eða 177 wött, en þeirri nýtni er nánast aldrei náð.

Vindmyllur af svipaðari gerð og ásvindmyllan ná að hámarki um 30 % nýtni en spaðavindmyllur ná að hámarki rúmlega 50 % nýtingu [7].

Fræðilega mesta afl sem þessi útfærsla af ásvindmyllu getur afkastað er 21,6 wött við 10 m/s eins og sjá má í viðauka I, reiknað út frá formúlu 6.24. Samkvæmt niðurstöðum mælinga í Þykkvabæ þá skilaði ásvindmyllan 6,6 wöttum við 10 m/s.

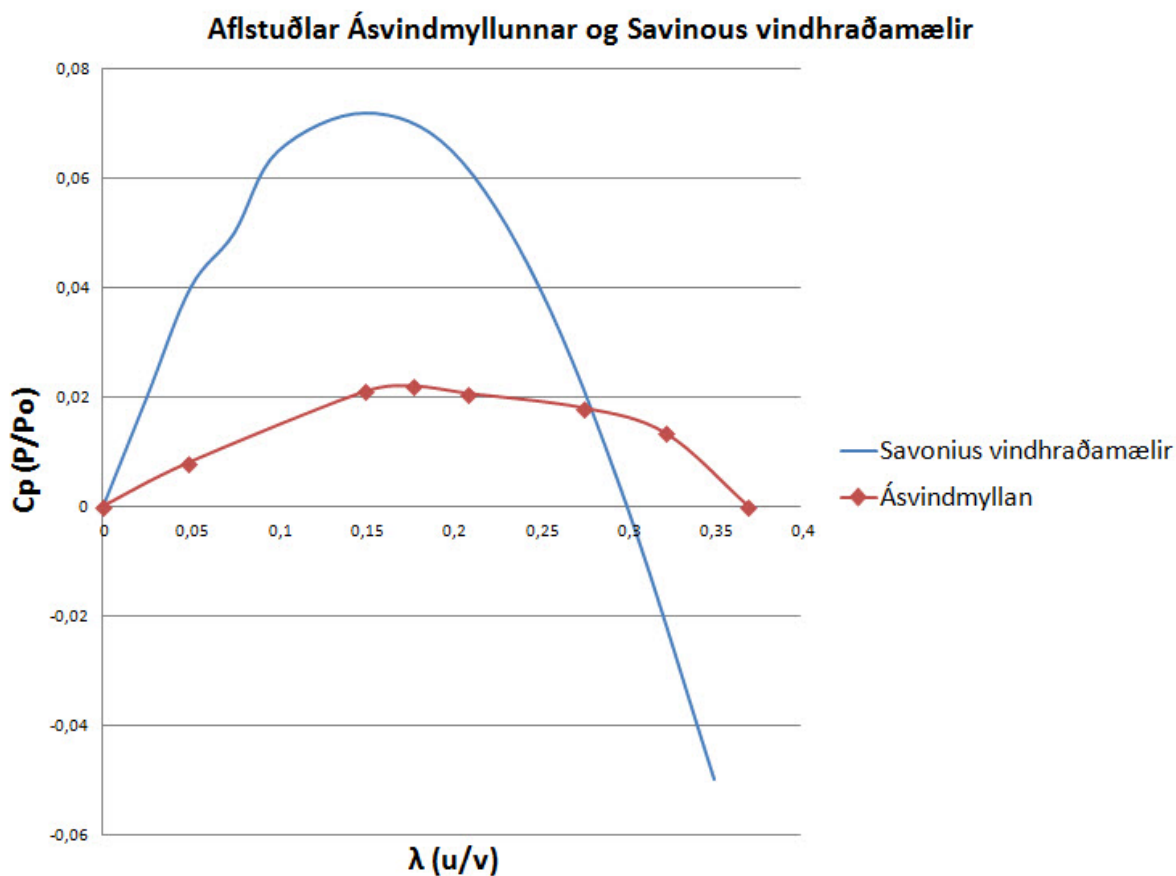
Til samanburðar þá er aflstuðulskúrfan fyrir ásvindmylluna sett upp í graf og borin saman við fræðilega bestu aflstuðla annarra vindmylla.



Mynd 7.8: Aflstuðlar fyrir mismunandi gerðir vindmylla.
[23]

Eins og sést á grafinu á mynd 7.8 þá er aflstuðull ásvindmyllunnar mjög lár samanborið við hámarksaflstuðul Savonius vindmylla, það gefur til kynna að bæta mætti hönnun ásvindmyllunnar til muna.

Ef nýtnistuðull fyrir vindhraðamæli á mynd 6.3 er borinn saman við nýtnistuðul ásvindmyllunnar þá sést að ásvindmyllan nær ekki hámarksafstuðli vindhraðamælisins og gefur það ákveðna mynd af því hversu litlu afli ásvindmyllan afkastar.



Mynd 7.9: Afstuðull vindhraðamælis samanborinn við afstuðul ásvindmyllunnar.

Við þennan samanburð var ákveðið að hafa viðnámsstuðlana þá sömu og fyrir vindhraðamælinn eða 1,33 og 0,33. Mögulegt er þó að skóflur ásvindmyllunnar hafi aðra viðnámsstuðla og má styðja að svo sé með því að setja þekkt gildi inn í formúlu 6.17. Þegar mælingar á vindmyllunni voru teknar í Þykkvabæ við 10 m/s þá var hraði blaðanna (e. blade tip speed), $u = 3.7m/s$. Þegar búið er að setja þau gildi inn í jöfnuna þá fæst að afstuðullinn $C_P = -0,07$ sem þýðir að þá hefði þurft að setja afl inn í kerfið. Vitað er að aflið sem ásvindmyllan afkastaði var 6,6 wött við 10 m/s og eru það um 2 % af mesta mögulega afli vindsins og ætti því afstuðull að vera meira en 2% þar sem afstuðull tekur ekki tillit til tapa.

7.7 Raforkuframleiðsla

Í þessari skýrslu verður ekki farið nákvæmlega út í það hvernig affið, sem vindmyllan afkastar, verður nýtt til raforkuframleiðslu enda margir möguleikar fyrir hendi og meginmarkið skýrslunnar líkt og áður segið að komast að því hve miklu affi er hægt að ná út úr vindmyllu af þessari gerð.

Eins og fram hefur komið þá eru margir möguleikar fyrir hendi þegar nýta á það afl sem vindmyllan afkastar og var ætlunin að framleiða jafnstraum með ásvindmyllunni. Þar sem að ekki er hægt að nota jafnstraum beint til heimilisnota eða að selja hann inn á landsnetið þá var hugmyndin sú að hlaða rafhlöður með vindmyllunni. Mikil þróun hefur átt sér stað í rafbílaframleiðslu síðustu ár og kom upp sú hugmynd að nota vindmyllurnar til að hlaða rafhlöður sem væri svo hægt að hlaða rafbílana með, þegar þeir koma að hleðslustöðinni.

Kafli 8

Niðurstöður

Skýrsluhöfundur batt miklar vonir við það að þessi útfærsla af vindmyllu gæti afkastað töliverðu affi. Þegar aflmælingar hófust í vindgöngum skólans þá kom strax í ljós að vægið sem vindmyllan gaf var frekar lítið.

Það sem hins vegar stóðst væntingar var snúningshraðinn sem vindmyllan náði, en í vindgöngunum náði vindmyllan rúmlega 1000 snúningum á mínútu við vindhraðann 30 m/s. Þar sem affið sem vindmyllan skilar er háð snúningshraða þá var reiknað með að vindmyllan gæti afkastað töluverðu affi en seinna kom í ljós að vægið var töluvert minna en reiknað hafði verið með og þar af leiðandi var affið sem vindmyllan afkastaði í vindgöngunum mjög lítið, en afl vindmyllunnar er líka háð væginu.

Við 20 m/s í vindgöngunum þá afkastaði vindmyllan um 20 wöttum sem verður að teljast frekar lítið þar sem vindhraði á Íslandi nær mjög sjaldan þeim vindstyrk. Til samanburðar þá þurfa venjulegar ljósaperur inn á heimili um 60 wött og gæti þessi vindmylla því ekki framleitt nægilegt afl til að kveikja á einni ljósaperu.

Mikilvægt er að lesandi átti sig á því að affið sem vindmyllan gefur er það afl sem næst beint af öxlinum neðan á vindmyllunni. Þá á eftir að koma fyrir rafal og öðrum búnaði til að framleiða rafmagnið og er ekki hægt að reikna með 100% nýtni á þeim búnaði. Þess vegna er affið sem kemur til með að nýtast til raforkuframleiðslu minna en í niðurstöðum mælinganna.

Eftir að búíð var að taka mælingar á vindmyllunni í vindgöngunum þá var hún flutt austur í Þykkvabæ sem er um 100 kílómetra austur af Reykjavík. Munurinn á mælingunum sem framkvæmdar voru í vindgöngunum og svo utandyra var sá að vindurinn var ekki stöðugur úti eins og hann var í vindgöngunum og því var erfiðara að ná góðum og nákvæmum mælingum í Þykkvabæ. Ákveðið var að leysa það vandamál með því að taka þrjár mælingar með 10 mínútna millibili og fá þannig meðaltal. Út frá því meðaltali var svo affið, sem vindmyllan afkastaði við þann vindhraða sem var hverju sinni, reiknað. Þegar vindhraðinn var 14 m/s þá afkastaði vindmyllan 23 wöttum sem er álíka mikið afl og vindmyllan afkastaði við 20 m/s inni í vindgöngunum.

Þegar lagt var af stað með þetta verkefni var ætlunin að skoða hvort möguleiki væri á að nota vindmylluna til að knýja vatnsdælu. Tengja átti dælu við vindmylluna sem dældi vatni upp í ákveðna hæð og ofan í vatnstank. Vatnið átti að renna úr tankinum og í gegnum túrbínu sem framleiða átti riðstraum.

Eins og fram hefur komið þá framleiðir vindmyllan jafnstraum þegar búíð er að setja á hana rótor þar sem vindhraðinn er misjafn og þar af leiðandi snúningshraðinn.

Með því að dæla vatni upp í tank, einskonar geymslustað fyrir orkuna, þá er hægt að láta vatnið renna aftur niður í gegnum túrbínu með föstum hraða og þannig framleiða riðstraum.

Eftir að ljóst varð hve litlu affi vindmyllan skilaði þá var ákveðið að falla frá þeim áætlunum þar sem gera þarf ráð fyrir töpum í dælu, lögnum og fleiri hlutum sem þyrfti í uppsetningu á þessu kerfi og væri það rafmagn sem mögulega væri hægt að framleiða með þessari uppsetningu á kerfinu mjög lítið.

Kafli 9

Lokaorð og næstu skref

Í ljósi þess hve litlu affi vindmyllan afkastar þá telur skýrsluhöfundur ekki raunhæfan möguleika á að nota vindmylluna til að framleiða riðstraum til heimilisnota eða til að selja á landsnetið.

Eftir að hafa kafað í sögu vindmylla þá kom það í ljós að fyrstu vindmyllurnar voru ekki ósvipaðar þeirri sem skýrslan fjallar um, en þær snerust um lóðréttan ás. Vindmyllurnar hafa eftir það þróast þannig að meira er um vindmyllur sem snúast um láréttan ás, eða svokallaðar spaðavindmyllur, og verður því að teljast líklegt að raforkuframleiðslugeta þeirra sé meiri en vindmylla sem snúast um lóðréttan ás líkt og ásvindmyllan. Ástæðuna fyrir því má rekja til þess að spaðavindmyllur sem snúast um láréttan ás ná betri nýtni út úr vindinum en ásvindmyllurnar sem snúast um lóðréttan ás, ef miðað er við að vindmyllurnar séu með sama þverskurðarflatarmál sem vindurinn fer í gegnum.

Þrátt fyrir að snúningshraði vindmyllunnar hafi náð um 1000 snúningum á mínútu þá var vægi vindmyllunnar frekar lítið og er ástæðan sú að skóflur vindmyllunnar eru aðeins 40 cm breiðar og aðeins helmingur þeirrar breiddar fer í að snúa vindmyllunni, eða 20 cm, en hinn helmingurinn virkar sem viðnám á vindmylluna. Til að fá meira vægi út úr vindmyllunni þá væri hægt að breikka skóflur hennar.

Skóflunum á vindmyllunni svipar til blaða í túrbínunum og væri því áhugavert að skoða hversu miklu affi þessi lögum á blöðum skilaði ef mælingar væru teknar í ám eða í sjó. Þar sem eðlismassi vatns er margfalt meiri en eðlismassi lofts þá má ætla að affið sem vindmyllan skilar í sjó sé töluvert meira en afl vindmyllunnar í lofti.

Háskólinn í Reykjavík býr svo vel að eiga vatnshermir sem hægt væri að nota til að mæla affið sem skóflurnar gæfu við ákveðinn straumhraða vatnsins. Sem framhald á þessu verkefni væri hægt að taka vindmylluna í sundur og nota skóflurnar sex sem eru á álrörinu, útbúa undirstöður á endunum á rörinu og koma því fyrir lárétt í á og taka aflmælingar. Þar sem vindmyllan snerist óháð vindátt þá væri hægt að koma vindmyllunni fyrir ofan í sjó, til dæmis undir Gullinbrúnni og þannig nýta sjávarföllin til að snúa vindmyllunni.

Þar sem sjórinn flæðir að á einum tíma og frá á öðrum þá þyrfti álrörið með skóflunum að vera á kafi í vatni svo að rörið snerist í flóði og fjöru.

Einnig væri hægt að setja skóflurnar ofan í á sem rennur alltaf í sömu átt og þá hafa helming skóflanna upp úr vatninu og þannig minnka mótstöðuna.

Augljóst er því að möguleiki er á frekari rannsóknum á ásvindmyllunni þó svo að niðurstöður þessa verkefnis sýni fram á að afkastageta hennar í vindi er frekar lítil.

Heimildir

- [1] D. M. Dodge. (2001-2006) Illustrated history of wind power development. [Online]. Available: <http://telosnet.com/wind/early.html>
- [2] DA. (2007) 20 greatest innovation by muslims. [Online]. Available: <http://www.chillnite.com/3243/2007/10/20-greatest-innovations-by-muslims/>
- [3] Ásbjörn Blöndal, *Orkuþing 2001. Orkumening á Íslandi*. Reykjavík:Samorka, 2001, ch. Nýting vindorku, pp. 229–237.
- [4] W. W. E. Association, “Report 2010,” World Wind Energy Association, Tech. Rep., Apríl 2011. [Online]. Available: http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf
- [5] ———, “2012 Half-year Report,” World Wind Energy Association, Tech. Rep., Október 2012. [Online]. Available: http://www.wwindea.org/webimages/Half-year_report_2012.pdf
- [6] A. H. I. o.fl., “Beislun vindorku í borgarbyggð, fýsileikakönnun,” *Borgafjarðarstofa*, 2012. [Online]. Available: http://www.borgarbyggd.is/Files/Skra_0056195.pdf
- [7] R. G. og J. Twele, *Wind Power Plant*. Berlin:James and James, 2002, pp. 17–28.
- [8] W.-F. L. T.-Y. Lin, “Mechanism and Mechine Theory 48,” Elsevier, Tech. Rep., Október 2011. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/mechmt
- [9] NASA. (2012) What is drag? [Online]. Available: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/drag1.html>
- [10] L. R. G. C. Squadron. (2007) The four forces of flight-drag. [Online]. Available: <http://www.cap-ny153.org/forcesdrag.htm>
- [11] P. Gipe, *Wind energy comes of ages*. USA:John Wiley and Sons Inc, 1995.
- [12] M. Reeve. (2002) Post mill. [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Pitstone-windmill.600px.jpg>

- [13] W. Commons. (2005) Windmill fantail. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Windmill_fantail
- [14] (2012) Wind turbine installer. [Online]. Available: <http://www.windturbineinstaller.co/>
- [15] W. Commons. (2008) Lift force. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Lift_%28force%29
- [16] NASA. (2012) What is lift? [Online]. Available: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/lift1.html>
- [17] W. Commons. (2008) Savonius wind turbine. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Savonius-rotor_en.svg
- [18] F. A. og Kristján Orri Magnússon, “Líkanagerð og vindgangatilraunir fyrir vélfugl,” B.Sc lokaverkefni, Tech. Rep., Október 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1946/10644>
- [19] I. S. Ríkhartsson, Háskólinn í Reykjavík, Desember 2012, samtal við leiðbeinanda/Umsjónakennara.
- [20] R. G. og J. Twele, *Wind Power Plant*. Berlin:James and James, 2002, pp. 29–38.
- [21] W. Commons. (207) Betz’ law. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Betz_tube.jpg
- [22] L. Þór Leifsson, Háskólinn í Reykjavík, Nóvember 2012, samtal við kennara.
- [23] F. M. White, *Fluid Mechanics 7 Edition*. USA:Mc Graw Hill Higher Education, 2010.

Viðauki A

Mælingar í vindgöngum.

Lámarksvindhraði mældur

Í töflunni sést við hvaða vindhraða vindmyllan fer að snúast í vindgöngunum. Þegar að vindmyllan var svo farin að snúast var athugað hvenær hún stoppaði.

m/s	Hz	1	2	3	4	5	6	7
6	10							
6,5	10,83333		Stoppar	Stoppar			Stoppar	Stoppar
7	11,66667	Stoppar			Stoppar	Stoppar		
7,5	12,5	Af stað		Af stað			Af stað	
8	13,33333		Af stað			Af stað		Af stað
8,5	14,16667				Af stað			
9	15							
9,5	15,83333							
10	16,66667							
10,5	17,5							
11	18,33333							

Mynd A.1: Mælingar í vindgöngum.

Viðauki B

Snúningshraði vindmyllu í vindgöngum mældur án álags

Í þessari töflu sést snúningshraði vindmyllunnar án álags en með breytilegum vindhraða í göngum. Þessar mælingar eru teknar í vindgöngum skólans.

Vindhraði göng	Snúnings- hraði
m/s	1/min
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	62
9	177
10	240
11	274
12	321
13	363
14	408
15	440
16	483
17	530
18	
19	633
20	673
21	714
22	762
23	802
24	840
25	882
26	933
27	976
28	1015
29	1042
30	1086

Mynd B.1: Snúningshraði myllu án álags.

Viðauki C

Stilling á tíðni vindganganna

Í skýrslu um vindgöngin, sem unnin var af Fannari Andrasyni og Kristjáni Orra Magnússyni, kemur fram að vindhraðinn í göngunum er í línulegu sambandi við tíðni viftunnar. Í töflunni hér að neðan sést tafla sem útbúin var fyrir vindhraða frá 1 m/s uppí 30 m/s.

Vindhraði [m/s]	Tíðni viftu [Hz]
1	1,67
2	3,33
3	5,00
4	6,67
5	8,33
6	10,00
7	11,67
8	13,33
9	15,00
10	16,67
11	18,33
12	20,00
13	21,67
14	23,33
15	25,00
16	26,67
17	28,33
18	30,00
19	31,67
20	33,33
21	35,00
22	36,67
23	38,33
24	40,00
25	41,67
26	43,33
27	45,00
28	46,67
29	48,33
30	50,00

Mynd C.1: Vindhraði í göngum og tíðni viftunnar.

Viðauki D

Afmælingar á vindmyllu í vindgöngum skólans

Tafla D.1: Mælingar í vindgöngum við 10 m/s.

10 m/s	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
kg	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
rpm	225	201	170	147	75	65	34	0
Vægi [Nm]	0,000	0,049	0,074	0,098	0,123	0,147	0,172	0,196
Afl(W)	0,000	1,032	1,310	1,510	0,963	1,002	0,611	0,000

Tafla D.2: Mælingar í vindgöngum við 12 m/s.

12 m/s											
	0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	
kg	0	296	288	280	267	210	94	74	19	0	
rpm	320	296	288	280	267	210	94	74	19	0	
Vægi [Nm]	0,000	0,049	0,074	0,098	0,147	0,196	0,245	0,294	0,343	0,368	
Afl(W)	0,000	1,520	2,219	2,876	4,114	4,315	2,414	2,281	0,683	0,000	

Tafla D.3: Mælingar í vindgöngum við 14 m/s.

14 m/s													
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,3
kg	0	405	384	366	356	339	317	290	243	100	73	30	0
rpm	415	405	384	366	356	339	317	290	243	100	73	30	0
Vægi [Nm]	0,000	0,049	0,098	0,147	0,196	0,245	0,294	0,343	0,392	0,441	0,491	0,540	0,564
Afl(W)	0,000	2,080	3,945	5,640	7,314	8,706	9,770	10,427	9,985	4,623	3,750	1,695	0,000

Tafla D.4: Mælingar í vindgöngum við 16 m/s.

16 m/s														
	0	0,5	0,7	1	1,3	1,5	1,7	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,15
kg	0	470	456	441	428	397	386	353	339	279	232	93	35	0
rpm	494	470	456	441	428	397	386	353	339	279	232	93	35	0
Vægi [Nm]	0,000	0,123	0,172	0,245	0,319	0,368	0,417	0,491	0,540	0,613	0,662	0,711	0,736	0,773
Afl(W)	0,000	6,035	8,198	11,326	14,290	15,294	16,853	18,132	19,154	17,914	16,088	6,927	2,697	0,000

Tafla D.5: Mælingar í vindgöngum við 18 m/s.

18 m/s										
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,3	3,7	4	4,1
kg	601	563	533	501	479	408	292	134	57	0
rpm	0,000	0,123	0,245	0,368	0,491	0,613	0,809	0,907	0,981	1,006
Vægi [Nm]	0,000	7,230	13,689	19,300	24,604	26,196	24,748	12,733	5,856	0,000
Afl (W)	0,000	7,230	13,689	19,300	24,604	26,196	24,748	12,733	5,856	0,000

Tafla D.6: Mælingar í vindgöngum við 20 m/s.

20 m/s										
	0	1	2	3	4	5	5,5	6	6,2	6,2
kg	666	653	615	567	468	386	74	20	0	0
rpm	0,000	0,245	0,491	0,736	0,981	1,226	1,349	1,472	1,521	1,521
Vægi(Nm)	0,000	16,771	31,589	43,686	48,078	49,567	10,453	3,082	0,000	0,000
Afl (W)	0,000	16,771	31,589	43,686	48,078	49,567	10,453	3,082	0,000	0,000

Viðauki E

Aflmælingar á vindmyllu í Þykkvabæ

Í töflunum hér að neðan eru mælingar sem framkvæmdar voru í Þykkvabæ. Þegar þessar mælingar voru teknar var vindhraðinn 10 m/s.

Tafla E.1: Afmælingar í Skarði Þykkvabæ við meðalvindhraðann 10 m/s.

Mælingar
í
Skarði
Þykkvabæ

Dagsetning: 01.11.2012

Klukkan: 14.10

	1	2	3	4	5	6	7	8
Snúningshraði myllu[rpm]	340	295	250	200	180	130	40	0
Bremsun[kg]	0,0	0,5	0,8	1,2	1,5	1,7	2	2,2
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,196	0,295	0,368	0,417	0,491	0,540
Afl [W]	0,0	3,792	5,142	6,170	6,941	5,682	2,057	0,000

Dagsetning: 01.11.2012

Klukkan: 14.40

	1	2	3	4	5	6	7	8
Snúningshraði myllu[rpm]	370	320	280	210	170	150	50	0
Bremsun[kg]	0,0	0,5	0,8	1,2	1,5	1,7	2	2,2
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,196	0,295	0,368	0,417	0,491	0,540
Afl [W]	0,0	4,113	5,759	6,479	6,556	6,556	2,571	0,000

Dagsetning: 01.11.2012

Klukkan: 15.10

	1	2	3	4	5	6	7	8
Snúningshraði myllu[rpm]	350	310	260	190	160	150	50	0
Bremsun[kg]	0,0	0,5	0,8	1,2	1,5	1,7	2	2,2
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,196	0,295	0,368	0,417	0,491	0,540
Afl [W]	0,0	3,985	5,347	5,862	6,170	6,556	2,571	0,000
Meðal afl. [W]	0,0	4,0	5,4	6,2	6,6	6,3	2,4	0,0
Meðal sn. Hraði [rpm]	353	61 308	263	200	170	143	47	0

Í töflunum hér að neðan eru niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru í Pykkvabæ. Þegar þessar mælingar voru teknar var meðal vindhraðinn 14 m/s.

Tafla E.2: Afmælingar í Skarði Pykkvabæ við meðalvindhraða 14 m/s.

Mælingar í Skarði Pykkvabæ											
Dagsetning: 02.11.2012											
Klukkan: 12.00											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Snúningshraði myllu[rpm]	570	540	490	460	400	370	300	230	180	90	0
Bremsun[kg]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,246	0,368	0,491	0,614	0,737	0,859	0,982	1,105	1,228
Afl [W]	0,0	6,941	12,597	17,739	20,567	23,781	23,138	20,695	18,510	10,412	0,0

Dagsetning:02.11.2012

Klukkan: 12:30

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Snúningshraði myllu[rpm]	590	550	500	470	410	360	310	250	200	80	0
Bremsun[kg]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,246	0,368	0,491	0,614	0,737	0,859	0,982	1,105	1,228
Afl [W]	0,0	7,070	12,854	18,125	21,081	23,138	23,909	22,495	20,567	9,255	0,0

Dagsetning:02.11.2012

Klukkan: 12:50

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Snúningshraði myllu[rpm]	560	540	510	490	420	350	290	230	180	60	0
Bremsun[kg]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Vægi [Nm]	0,0	0,123	0,246	0,368	0,491	0,614	0,737	0,859	0,982	1,105	1,228
Afl [W]	0,0	6,941	13,111	18,896	21,595	22,495	22,367	20,695	18,510	6,941	0,0
Meðal afl [W]	0,0	6,984	12,854	18,253	21,081	23,138	23,138	21,295	19,196	8,869	0,0
Meðal sn. hraði [rpm]	573	543	500	473	410	360	300	237	187	77	0

Viðauki F

Vindhraðamælingar í Þykkvabæ

Í töflu F.1, á næstu síðu, má sjá mælingar á meðal vindhraðana þá tvo daga sem mælingar fóru fram. Framkvæmdar voru 20 augnabliksmælingar yfir 10 mínútna tímabil til að áætla meðalvindhraða við vindmylluna. Samkvæmt heimasíðu Veðurstofu Íslands þá var meðal vindhraði þá klukkustund sem mælingar voru framkvæmdar 01.11.2012 12 m/s, en niðurstöður mælinga skýrsluhöfundar voru að meðal vindhraði þessa klukkustundina hafi verið 10 m/s. Mæling sem framkvæmd var daginn eftir, 02.11.2012 gaf til kynna að meðal vindhraði hafi verið 14 m/s en á heimasíðu Veðurathugunarstöð Íslands kom fram að meðal vindhraði þá klukkustund sem mælingar fóru fram voru 16 m/s.

Tafla F.1: Mældur vindhraði í Pykkvabæ.

1.11.2012		2.11.2012	
1	12	1	16
2	10	2	15
3	12	3	11
4	9	4	13
5	16	5	15
6	10	6	12
7	8	7	10
8	9	8	18
9	12	9	10
10	11	10	10
11	10	11	15
12	10	12	15
13	9	13	16
14	8	14	17
15	10	15	13
16	11	16	15
17	10	17	14
18	9	18	11
19	8	19	16
20	9	20	16
Meðaltal	10,15	Meðaltal	13,9

Hér eru upplýsingar af heimasíðu Veðurstofu Íslands þar sem meðal vindhraði yfir hverja klukkustund kemur fram.

Fimmtudagur, 01. nóv. - Þykkvibær					
Tími	Vindur	Mesti vindur / hviða	Hiti	Uppsöfnuð úrkoma	Raka- stig
Fim 01.11 kl. 21:00	↙ 9 m/s	13 m/s / 19 m/s	-3,9 °C	0 mm / 1 klst	74 %
Fim 01.11 kl. 18:00	↙ 12 m/s	12 m/s / 18 m/s	-1,4 °C	0 mm / 1 klst	66 %
Fim 01.11 kl. 15:00	↙ 12 m/s	13 m/s / 18 m/s	0,3 °C	0 mm / 1 klst	55 %
Fim 01.11 kl. 12:00	↙ 12 m/s	12 m/s / 17 m/s	-0,1 °C	0 mm / 1 klst	54 %
Fim 01.11 kl. 09:00	↙ 10 m/s	10 m/s / 15 m/s	-1 °C	0 mm / 1 klst	61 %
Fim 01.11 kl. 06:00	↙ 11 m/s	13 m/s / 18 m/s	0 °C	0 mm / 1 klst	66 %
Fim 01.11 kl. 03:00	↙ 9 m/s	13 m/s / 18 m/s	0,3 °C	0 mm / 1 klst	74 %
Fim 01.11 kl. 00:00	↙ 10 m/s	11 m/s / 16 m/s	1,5 °C	0 mm / 1 klst	69 %

Mynd F.1: Vindhraði m.v. veðurathugunarstöð Íslands þann 01.11.2012.

Föstudagur, 02. nóv. - Þykkvibær					
Tími	Vindur	Mesti vindur / hviða	Hiti	Uppsöfnuð úrkoma	Raka- stig
Fös 02.11 kl. 21:00	↓ 9 m/s	15 m/s / 20 m/s	1,4 °C	0 mm / 1 klst	64 %
Fös 02.11 kl. 18:00	↓ 10 m/s	11 m/s / 18 m/s	0,7 °C	0 mm / 1 klst	66 %
Fös 02.11 kl. 15:00	↓ 13 m/s	14 m/s / 21 m/s	0,6 °C	0 mm / 1 klst	62 %
Fös 02.11 kl. 12:00	↓ 16 m/s	17 m/s / 25 m/s	-0,2 °C	0 mm / 1 klst	63 %
Fös 02.11 kl. 09:00	↓ 14 m/s	14 m/s / 22 m/s	-0,1 °C	0 mm / 1 klst	61 %
Fös 02.11 kl. 06:00	↙ 13 m/s	14 m/s / 20 m/s	-1,5 °C	0 mm / 1 klst	62 %
Fös 02.11 kl. 03:00	↓ 11 m/s	13 m/s / 18 m/s	-2,9 °C	0 mm / 1 klst	60 %
Fös 02.11 kl. 00:00	↓ 13 m/s	13 m/s / 19 m/s	-3,4 °C	0 mm / 1 klst	56 %

Mynd F.2: Vindhraði m.v. veðurathugunarstöð Íslands þann 02.11.2012.

Viðauki G

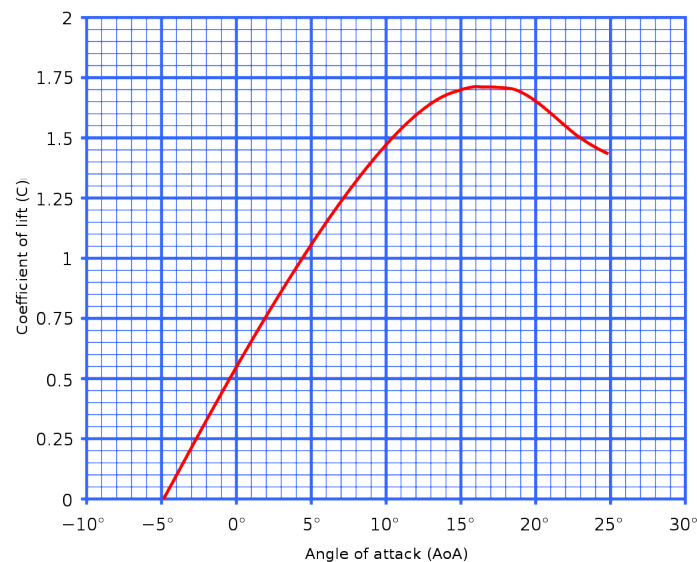
Viðnámsstuðlar, C_D og C_L

Í töflunni hér að neðan eru nokkrir viðnámsstuðlar fyrir mismunandi yfirborð og eru þeir notaðir til að reikna viðnámskraft.(e. Drag)

Tafla G.1: Viðnámsstuðlar.

C_D	Yfirborð
1,11	Hringlaga plata
1,10	Ferhyrnd plata
0,33	Hálf kúla(opið undan vindstefnu)
1,33	Hálf kúla(opið á móti vindstefnu)

Hér að neðan er graf sem sýnir kraftstuðulinn C_L fyrir samhverfa vængi.



Mynd G.1: Lyftistuðull fyrir samhverfa flugvélavængi.

Viðauki H

Veðurgögn frá Veðurstofu Íslands

Í töflunni hér að neðan er meðal vindhraði í Pykkvabæ frá árinu 2006-2011. Einnig sést hve marga daga á ári vindhraðinn fer yfir vindhraðann 6 m/s en það er sá vindhraði sem þarf til að vindmyllan byrji að snúast úti í náttúrunni.

Tafla H.1: Vindhraði í Pykkvabæ 2006-2011.

Ár	Meðalvindhraði [m/s]	Klst > 6 m/s	Dagar
2006	6,01	3802	158
2007	6,01	3761	157
2008	5,81	3704	154
2009	5,69	3475	145
2010	5,17	2963	123
2011	6,15	3914	163
Meðaltal	5,8	3603	150

Í töflunni hér að neðan er búið að taka saman vindhraða á árunum 2006-2011. Út frá veðurgögnum Veðurstofu Íslands var fundinn fjöldi klukkustunda sem tiltekinn vindhraði varði í. Sem dæmi var vindhraðinn 1-2 m/s í að meðaltali 25 daga á ári, að meðaltali á þessu 6 ára tímabili.

Búið er að taka saman hvað margar klukkustundir hver vindhraði varir lengi að meðaltali ár hvert.

Tafla H.2: Skipting á vindhraða.

2006-2011		
m/s	Fj. Klst	Dagar á ári að meðaltali
1-2	3600	25
2-3	6219	43,2
3-4	6983	48,5
4-5	6487	45,0
5-6	5126	35,6
6-7	4992	34,7
7-8	4349	30,2
8-9	3498	24,3
9-10	2823	19,6
10-11	2086	14,5
11-12	1438	10,0
12-13	1013	7,0
13-14	634	4,4
14-15	424	2,9
15-16	249	1,7
16-17	210	1,5
17-18	141	1,0
18-19	81	0,6
19-20	47	0,3
20-21	19	0,1
21-22	20	0,1

Viðauki I

Útreikningar á fræðilega mesta affli Ásvindmyllunnar

Eins og fram hefur komið þá býr vindurinn yfir miklu affli og er fræðilegt hámarksaffli vindsins við 10 m/s reiknað út frá formúlu 6.1

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,4 \cdot 1,2 \cdot 10^3$$

þá fæst að

$$P_{wind} = 300 \text{ [W]}$$

Útleiðsla á fræðilegu affli sem Savonius vindmylla getur afkastað m.v. $C_{D1} = 1.33$ og $C_{D2} = 0.33$

$$P = F \cdot v = (D_{dr} - D_{sl}) \cdot u \quad (\text{I.1})$$

$$P = (C_{D1} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v - u)^2 - C_{D2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v + u)^2) \cdot u \quad (\text{I.2})$$

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot [C_{D1} \cdot (v - u)^2 - C_{D2} \cdot (v + u)^2] \cdot u \quad (\text{I.3})$$

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot [C_{D1} \cdot (1 - \frac{u}{v})^2 \cdot v^2 - C_{D2} \cdot (1 + \frac{u}{v})^2 \cdot v^2] \cdot u \quad (\text{I.4})$$

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot [C_{D1} \cdot (1 - \frac{u}{v})^2 \cdot v^2 \cdot u \cdot \frac{v}{v} - C_{D2} \cdot (1 + \frac{u}{v})^2 \cdot v^2 \cdot u \cdot \frac{v}{v}] \quad (\text{I.5})$$

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 [C_{D1} \cdot (1 - \frac{u}{v})^2 \cdot \frac{u}{v} - C_{D2} \cdot (1 + \frac{u}{v})^2 \cdot \frac{u}{v}] \quad (\text{I.6})$$

$$P = P_O [C_{D1} \cdot (1 - \lambda)^2 - C_{D2} \cdot (1 + \lambda)^2] \cdot \lambda \quad (\text{I.7})$$

$$P = P_O [C_{D1} \cdot (1 - 2 \cdot \lambda + \lambda^2) - C_{D2} \cdot (1 + 2 \cdot \lambda + \lambda^2)] \cdot \lambda \quad (\text{I.8})$$

$$P = P_O [(C_{D1} - C_{D2}) \cdot \lambda^2 - 2 \cdot (C_{D1} + C_{D2}) \cdot \lambda + (C_{D1} + C_{D2})] \cdot \lambda \quad (\text{I.9})$$

$$P = P_O[1.33 - 0.33) \cdot \lambda^2 - 2 \cdot (1.33 + 0.33) \cdot \lambda + (1.33 + 0.33)] \cdot \lambda \quad (\text{I.10})$$

$$P = P_O \cdot (\lambda^2 - 3.6 \cdot \lambda + 1) \cdot \lambda \quad (\text{I.11})$$

Mesta fræðilega afl samkvæmt formúlu 6.24 er

$$P_{MAX.asvindmylla} = 300 \cdot 0.072 = 21.6[W] \quad (\text{I.12})$$

Afl ásvindmylunnar reiknað út frá formúlu 6.17 við 10 m/s

$$P = P_O \cdot (\lambda^2 - 3,6 \cdot \lambda + 1) \cdot \lambda \quad (\text{I.13})$$

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{3,7^2}{10} - 3,6 \cdot \frac{3,7}{10} + 1 \right) \frac{3,7}{10} = -21.65 \quad (\text{I.14})$$

Hér sést að niðurstaðan er - tala og því er ljóst að viðnámsstuðlarnir eru aðrir en reiknað var með [22].

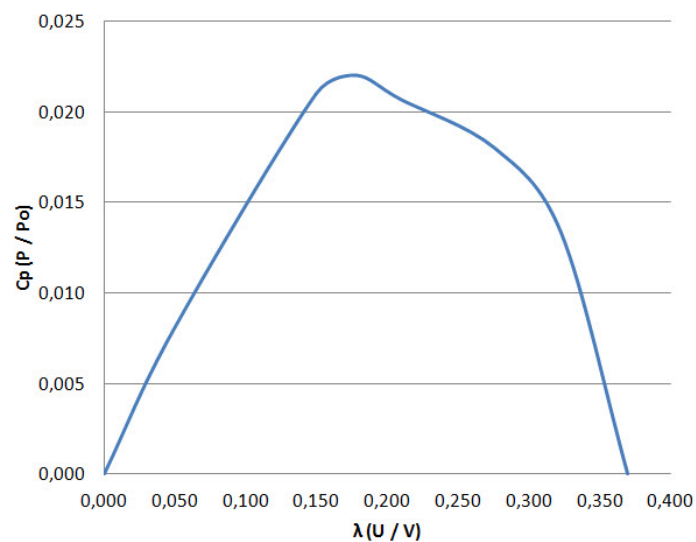
Hér eru útreikningar á hraðanum u , hornhraðanum ω og út frá þessum niðurstöðum var aflstuðulskúrfan teiknuð upp í graf.

Po=	300	Afl[W]	rpm	w[rad/s]	u[m/s]
v=	10	0	353	36,94733	3,694733
r=	0,1	4	308	32,23733	3,223733
		5,4	263	27,52733	2,752733
		6,2	200	20,93333	2,093333
		6,6	170	17,79333	1,779333
		6,3	143	14,96733	1,496733
		2,4	47	4,919333	0,491933
		0	0	0	0

Ás.mylla

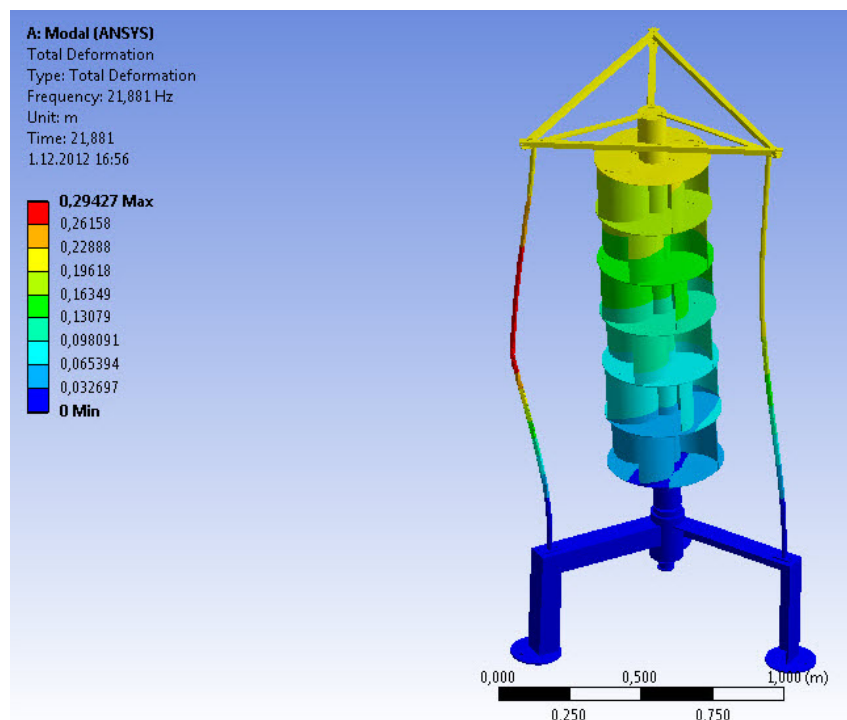
C _p	U/V
0,000	0,369
0,013	0,322
0,018	0,275
0,021	0,209
0,022	0,178
0,021	0,150
0,008	0,049
0,000	0,000

Kraftstuðulskúrfa Ásvindmyllunnar

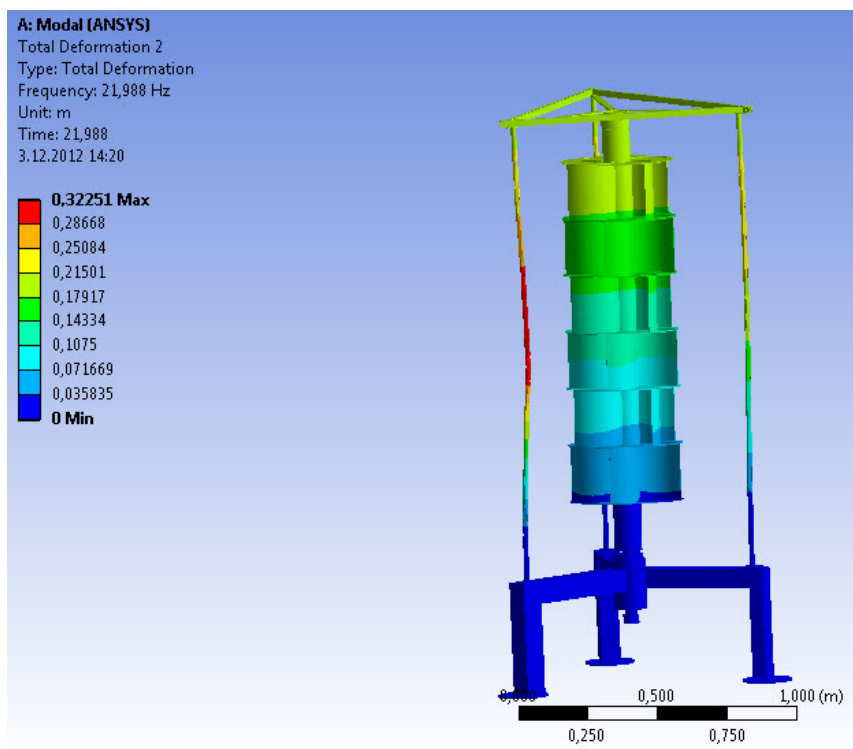


Viðauki J

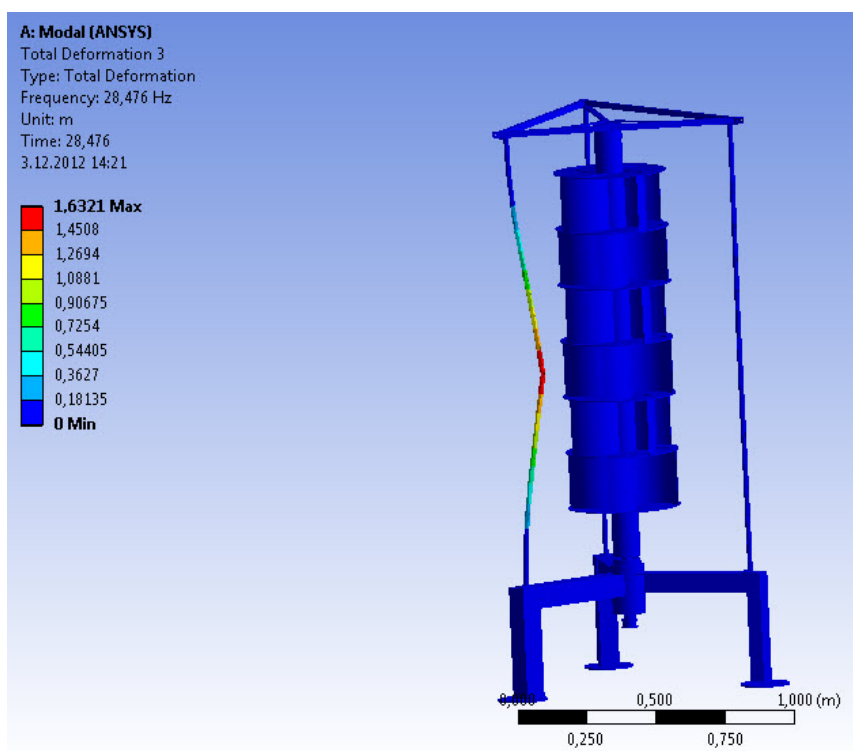
Ansysis greining



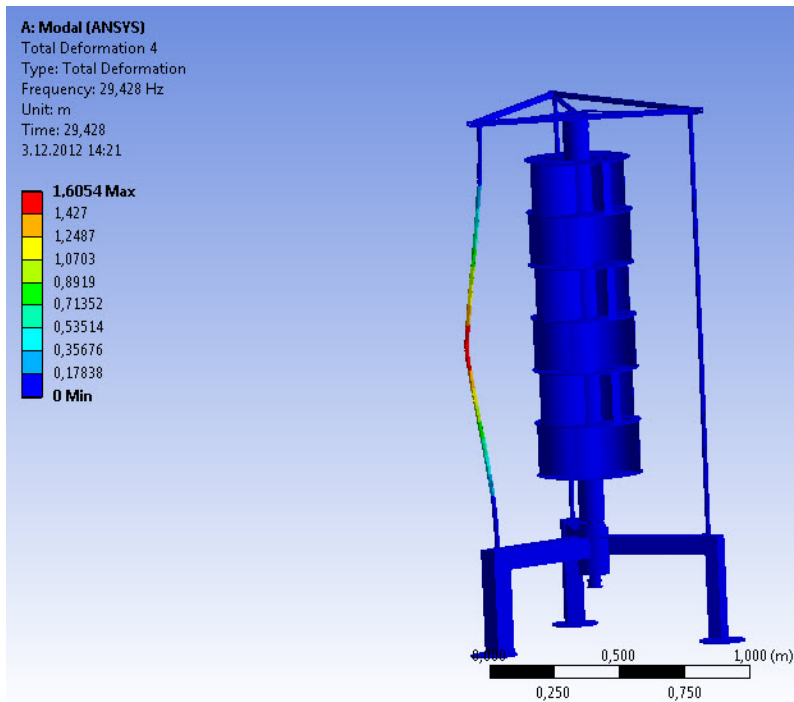
Mynd J.1: 1. eigintíðni ásvindmyllunnar.



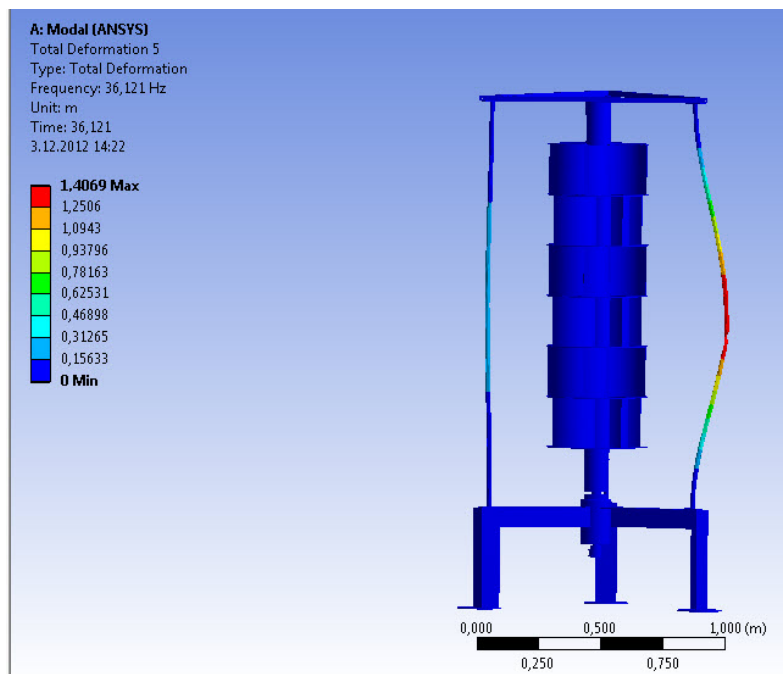
Mynd J.2: 2. eigintíðni ásvindmyllunnar.



Mynd J.3: 3. eigintíðni ásvindmyllunnar.



Mynd J.4: 4. eigintíðni ásvindmyllunnar.



Mynd J.5: 5. eigintíðni ásvindmyllunnar.

Viðauki K

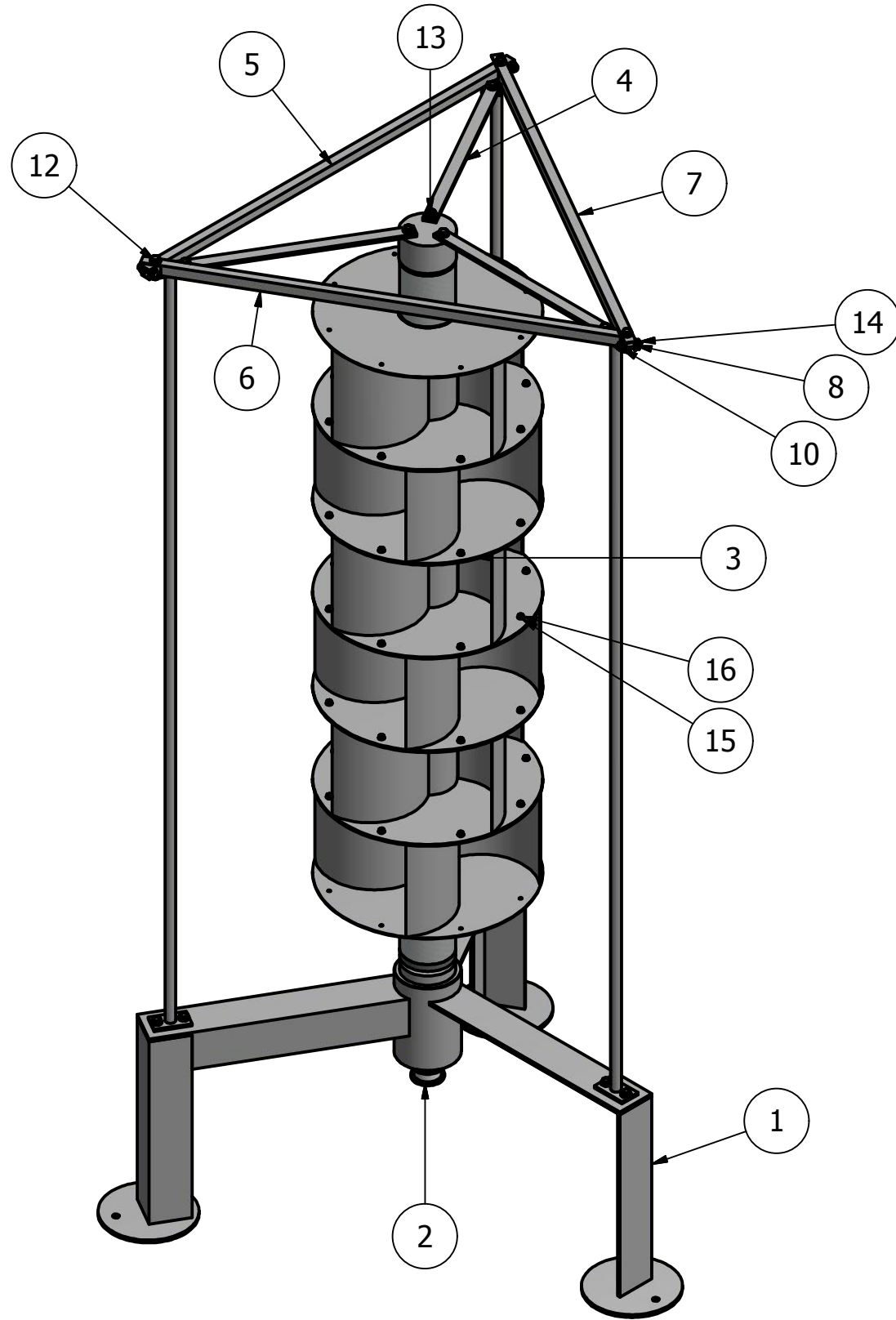
Smíðateikningar

Í þessum viðauka eru smíðateikningar af ásvindmyllunni.

Athuga skal að öll mál eru í mm.

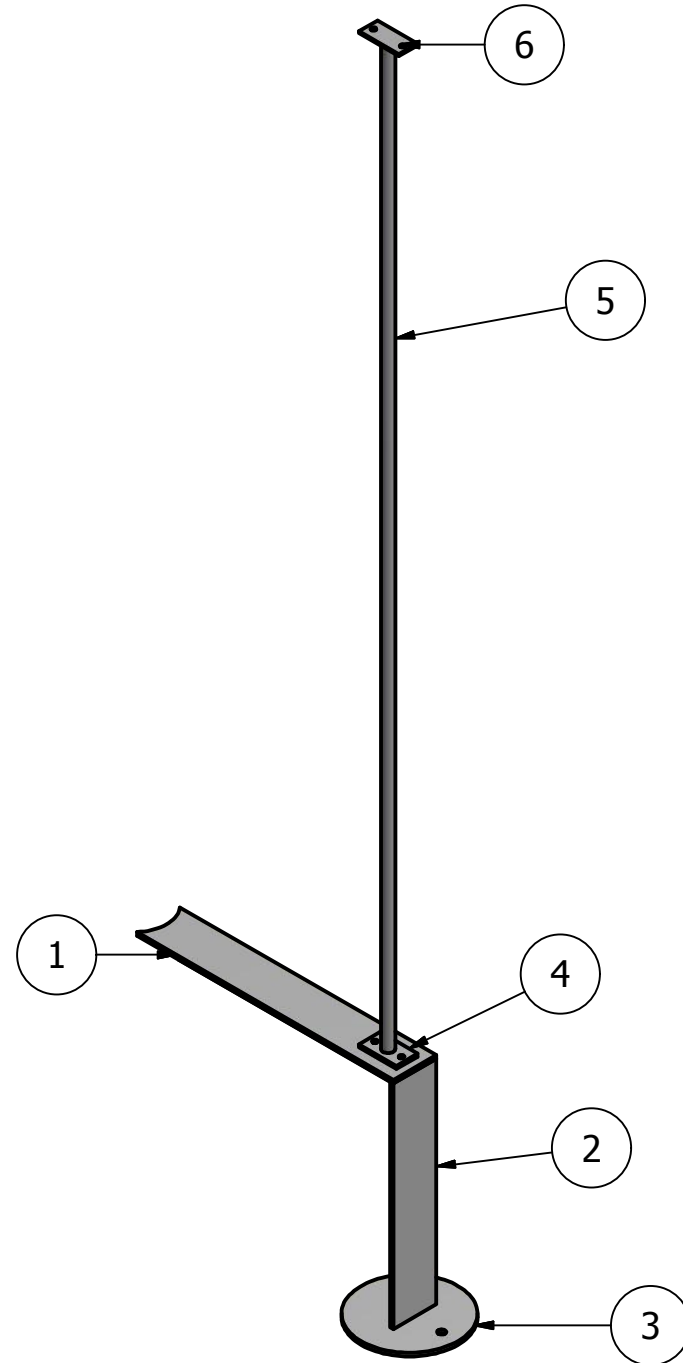
Vikmál er $\pm 0,1$

MKV (1:11)



PARTS LIST						
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION			
1	3	2001_1				
2	1	2002_2				
3	6	2002_3				
4	3	1009				
5	1	1016				
6	1	1016_2				
7	1	1016_3				
8	33	ANSI B18.22M - 8 N	Metric Plain Washers			
9	3	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1,25 x 25	Hex Bolt			
10	15	ANSI B 18.2.4.1 M - M8 x 1,25	Hex Nut			
11	6	ANSI B18.2.3.2M - M8 x 1,25	Metric Formed Hex Screw - Formed Hex Screw - Metric (2)			
12	3	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1,25 x 40	Hex Bolt			
13	3	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1,25 x 55	Hex Bolt			
14	3	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1,25 x 35	Hex Bolt			
15	80	ANSI B18.22M - 5 N	Metric Plain Washers			
16	40	ANSI B18.2.3.5M - M5 x 0,8 x 14	Hex Bolt			
17	40	ANSI B 18.2.4.1 M - M5 x 0,8	Hex Nut			
Designed by Þórður Sigurbjartsson		Checked by	Approved by	Date	Date	
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		Edition	Sheet	
					1 / 25	

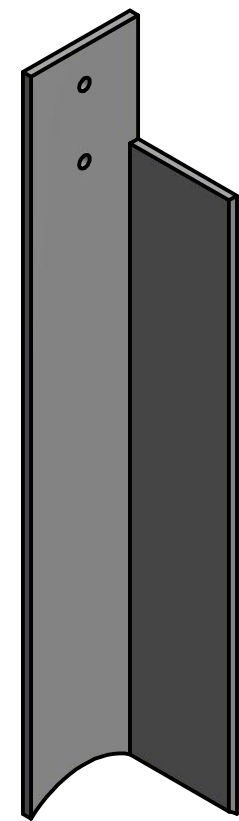
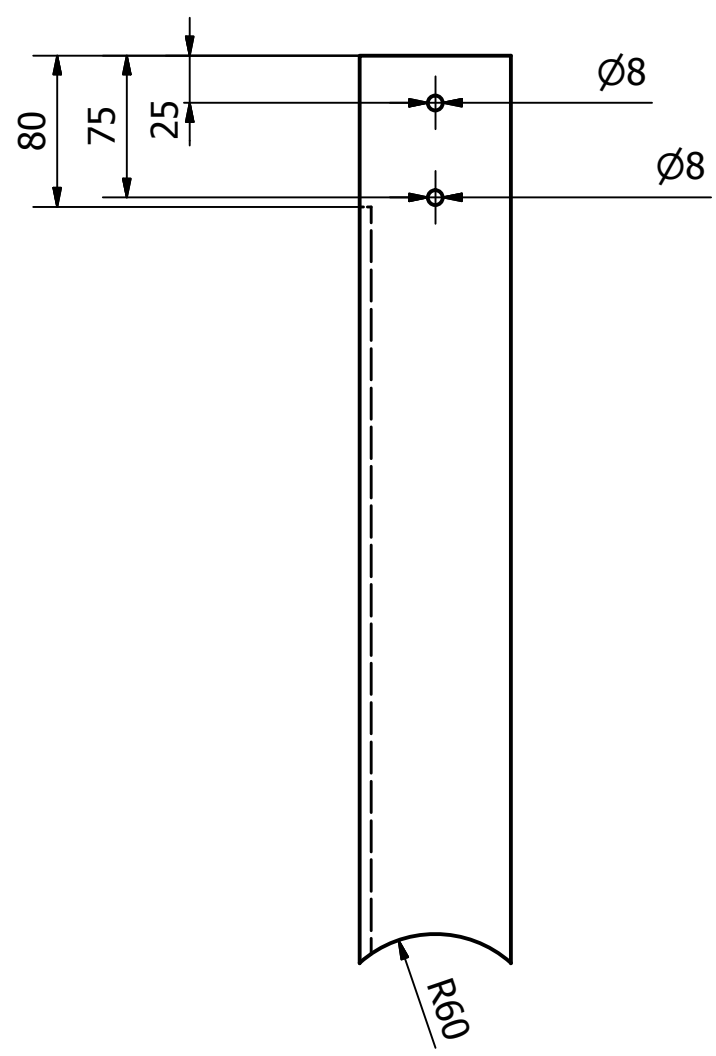
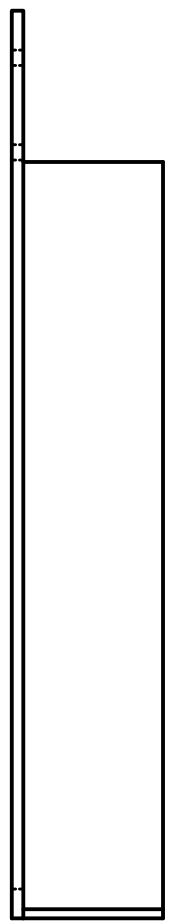
MKV (1:10)



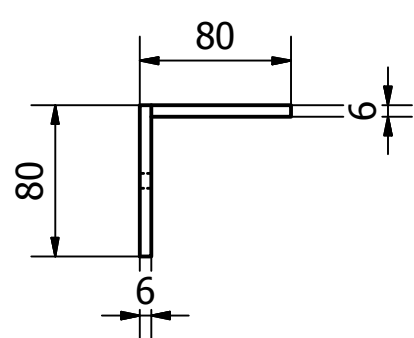
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	1004_1	
2	1	1004_2	
3	1	1004_3	
4	1	1004_4	
5	1	1004_5	
6	1	1004_6	
Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka	
		Edition	Sheet 2 / 25

MKV (1:4)

D
C
B
A



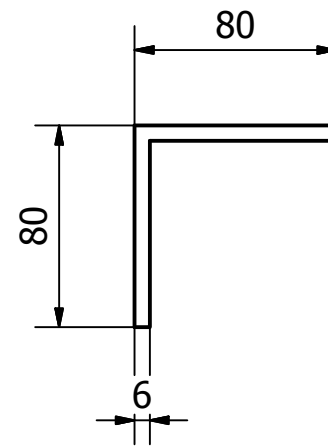
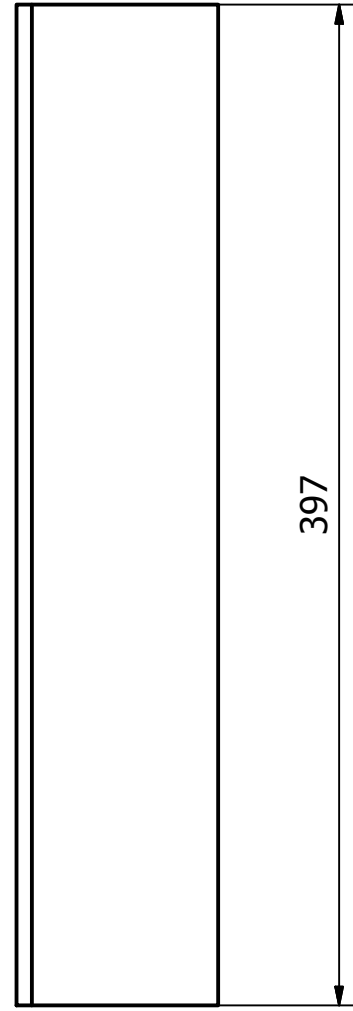
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



Vinkiljárn
3 stk

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
2000loka			Edition	Sheet 3 / 25	

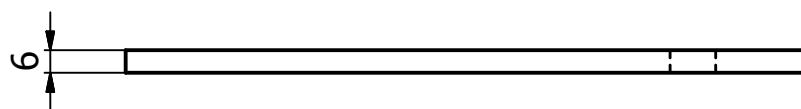
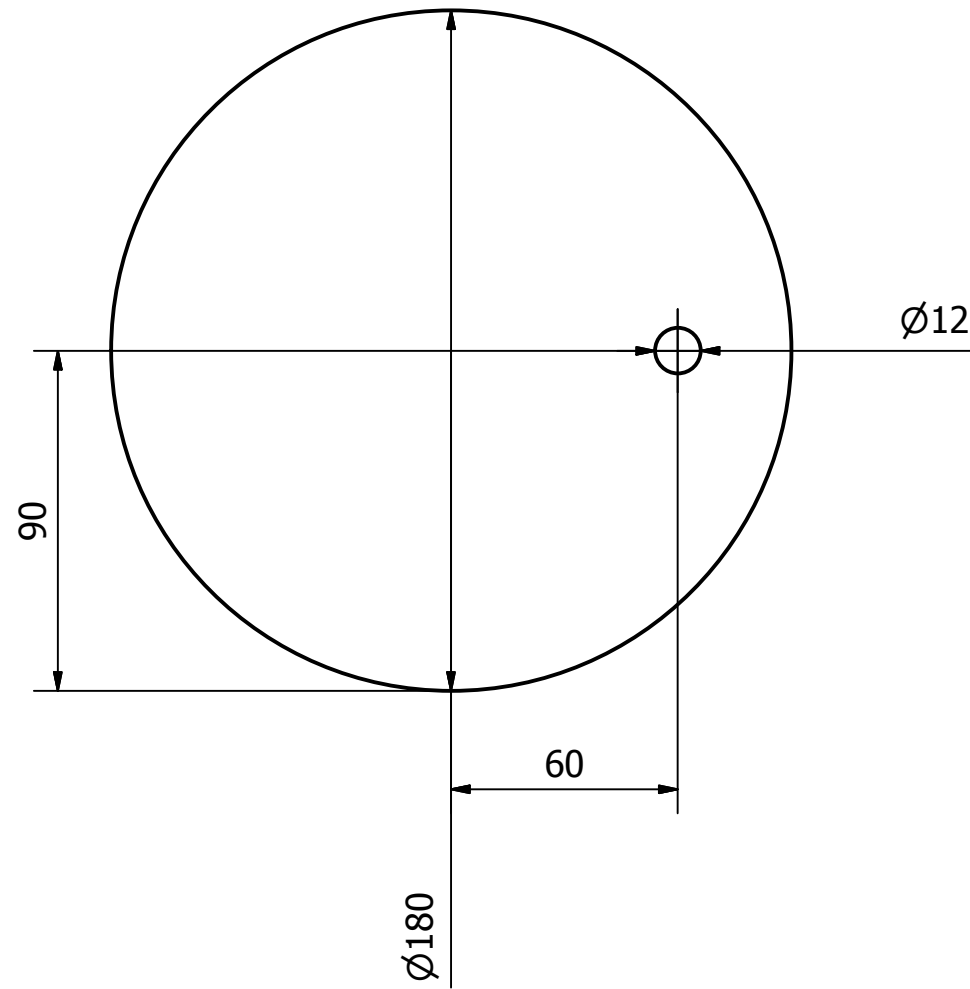
MKV (1 : 3)



Vinkiljárn
3 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		Edition	Sheet 4 / 25

MKV (1 : 2)

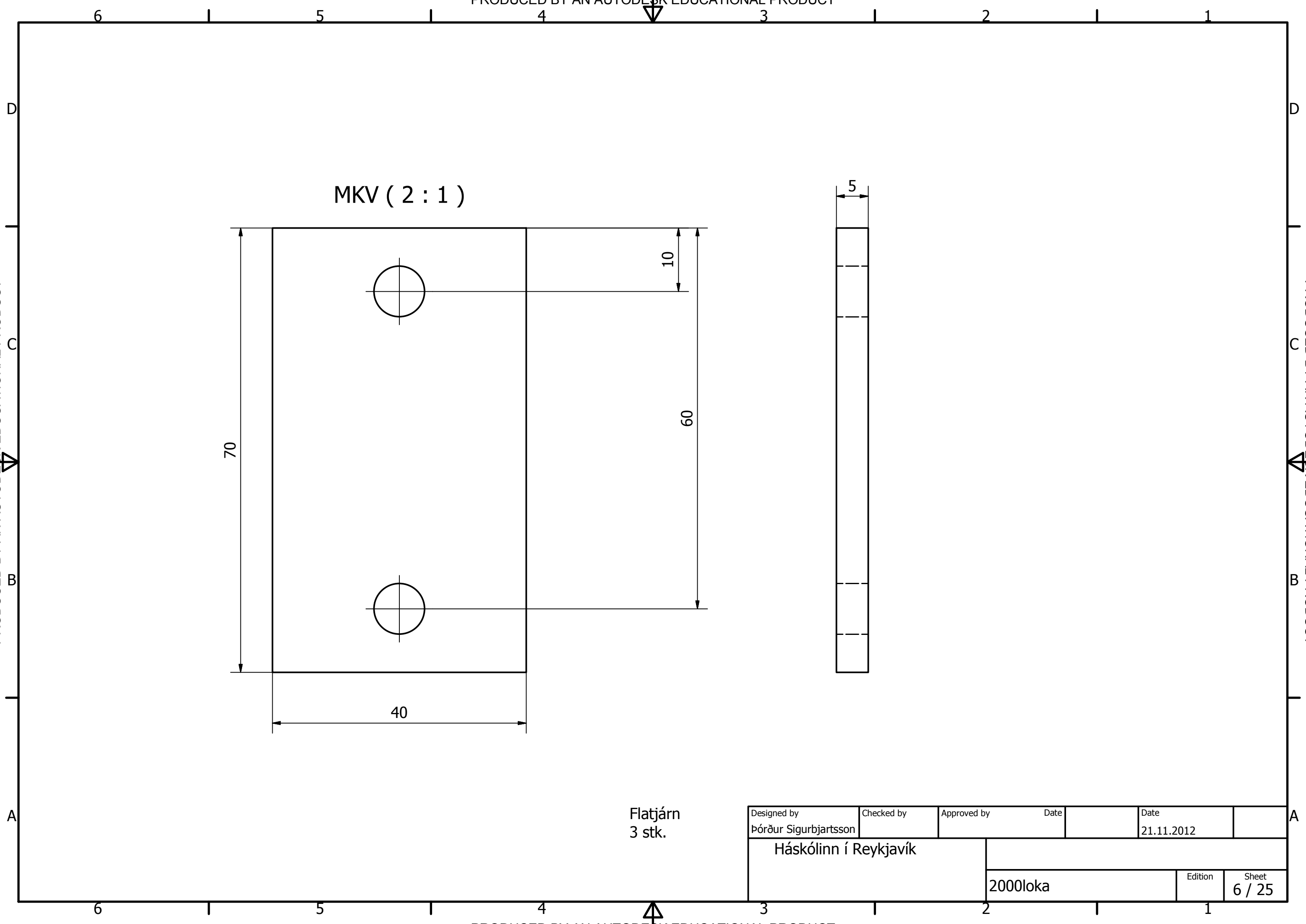


Flatjárn 3 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
2000loka			Edition	Sheet 5 / 25	

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



MKV (2 : 1)

70

40

10

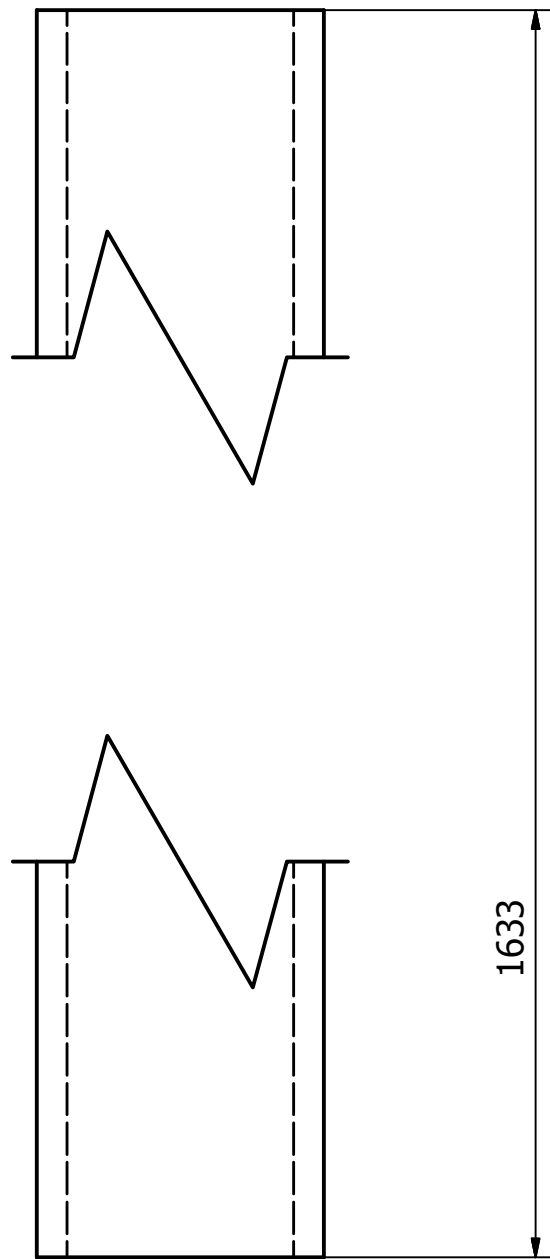
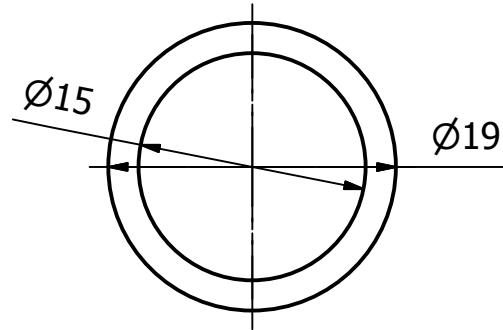
60

5

Flatjárn
3 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 6 / 25

MKV (2:1)



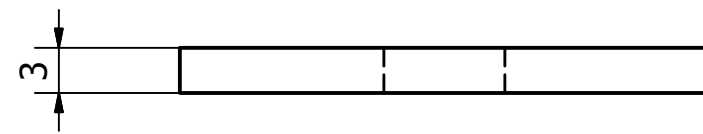
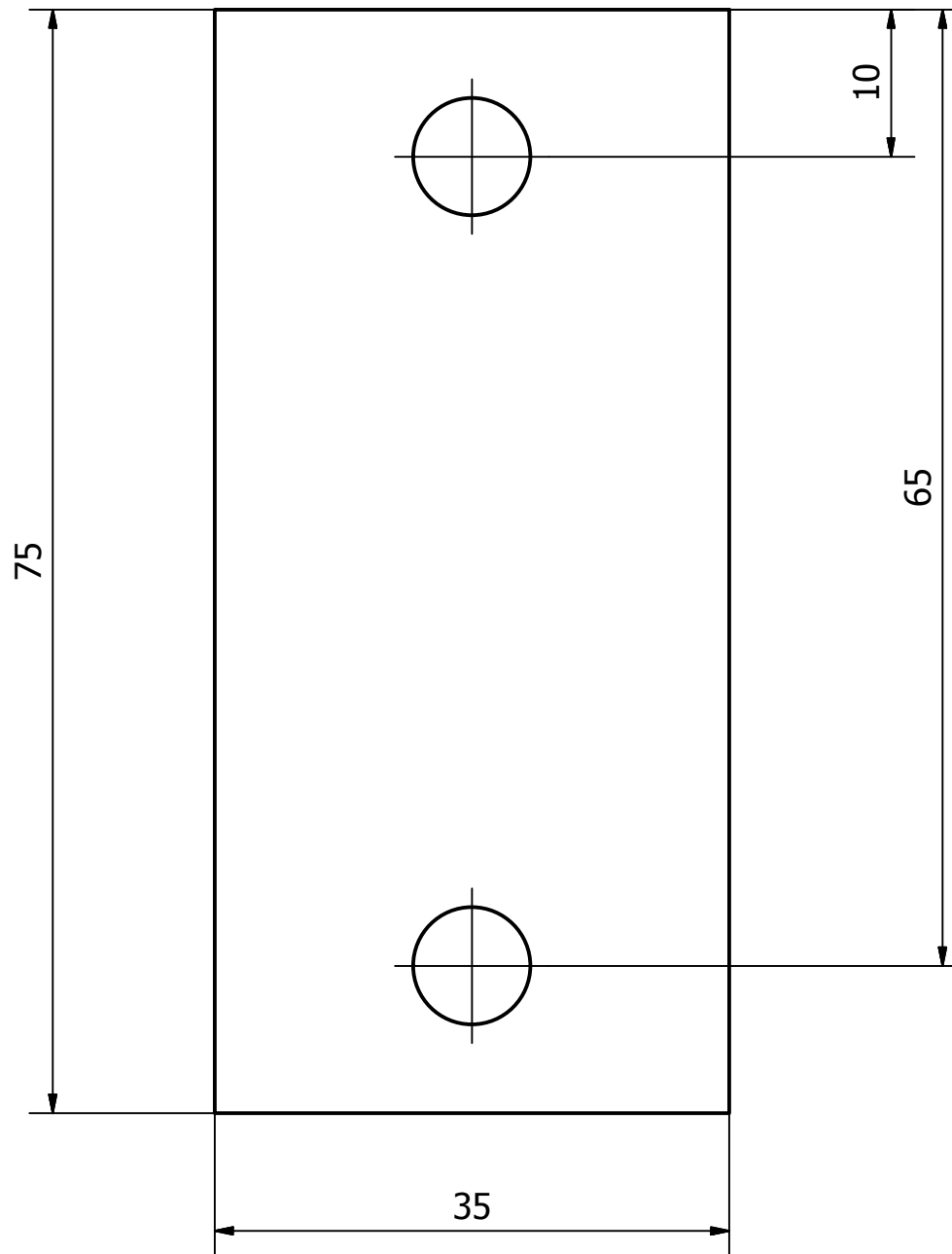
Járn rör
3 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 7 / 25

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

MKV (2 : 1)



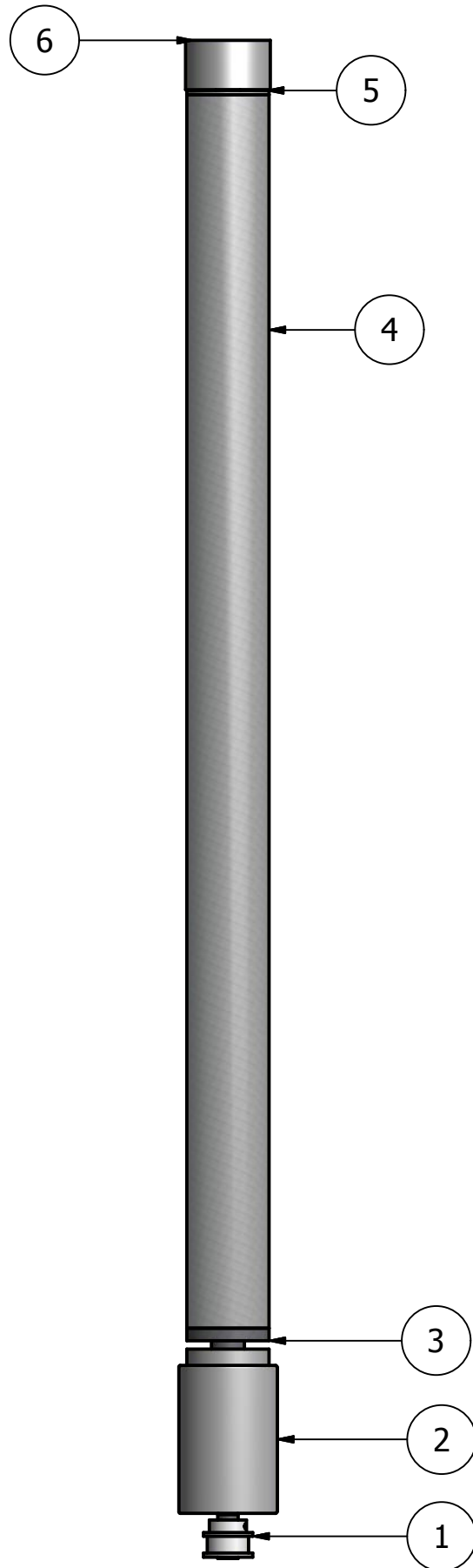
Flatjárn
3 Stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 8 / 25

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

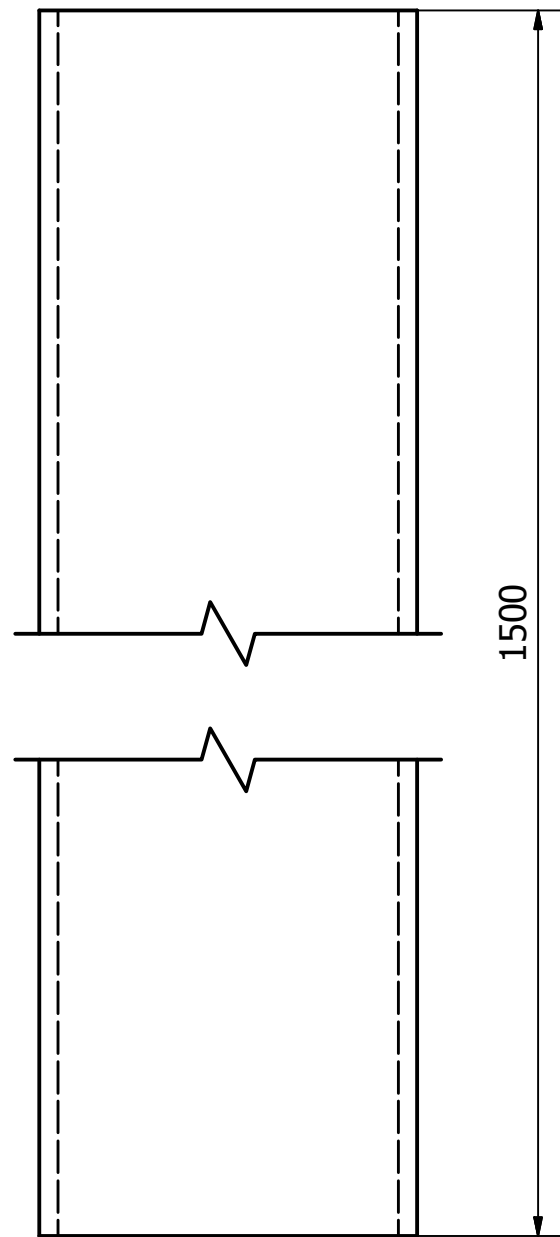
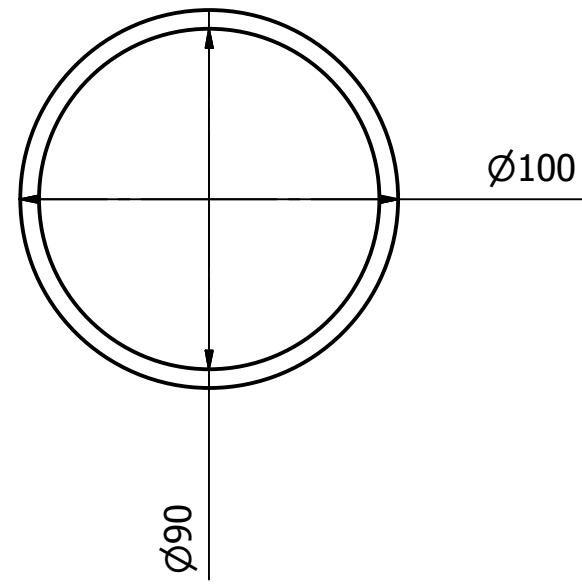
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

MKV (1:8)



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	2003	
2	1	undirstmidja	
3	1	Kílhjól	
4	1	Álrör(1512mm)	
5	1	1006	
6	1	1007	
7	1	1008	
8	1	1010	
9	1	1011	
Designed by Þórður Sigurbjartsson		Checked by	Approved by
			Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík			
		2000loka	Edition Sheet 9 / 25

MKV (1 : 2)



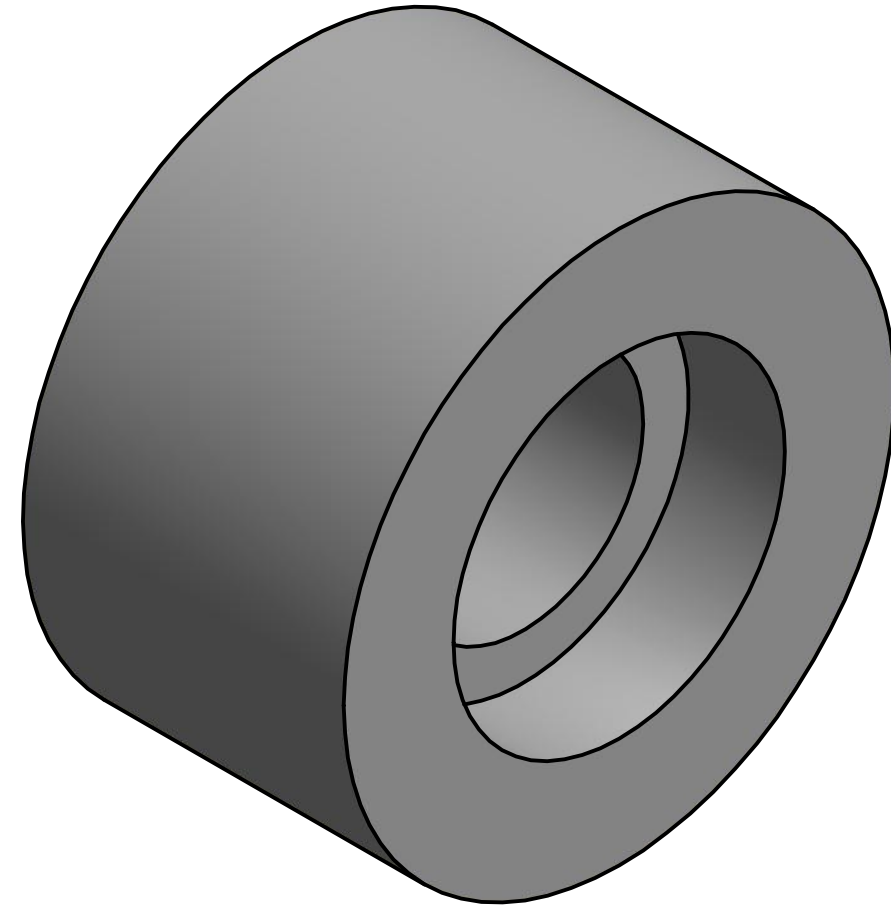
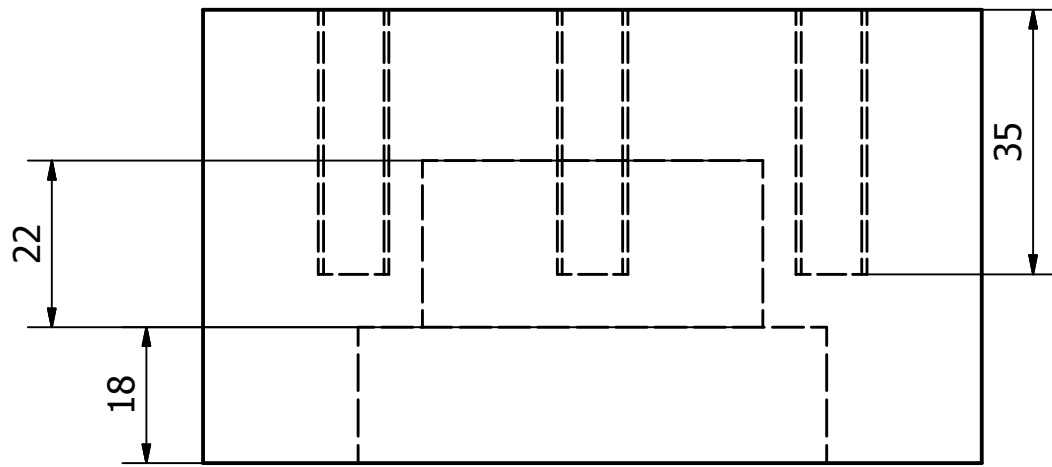
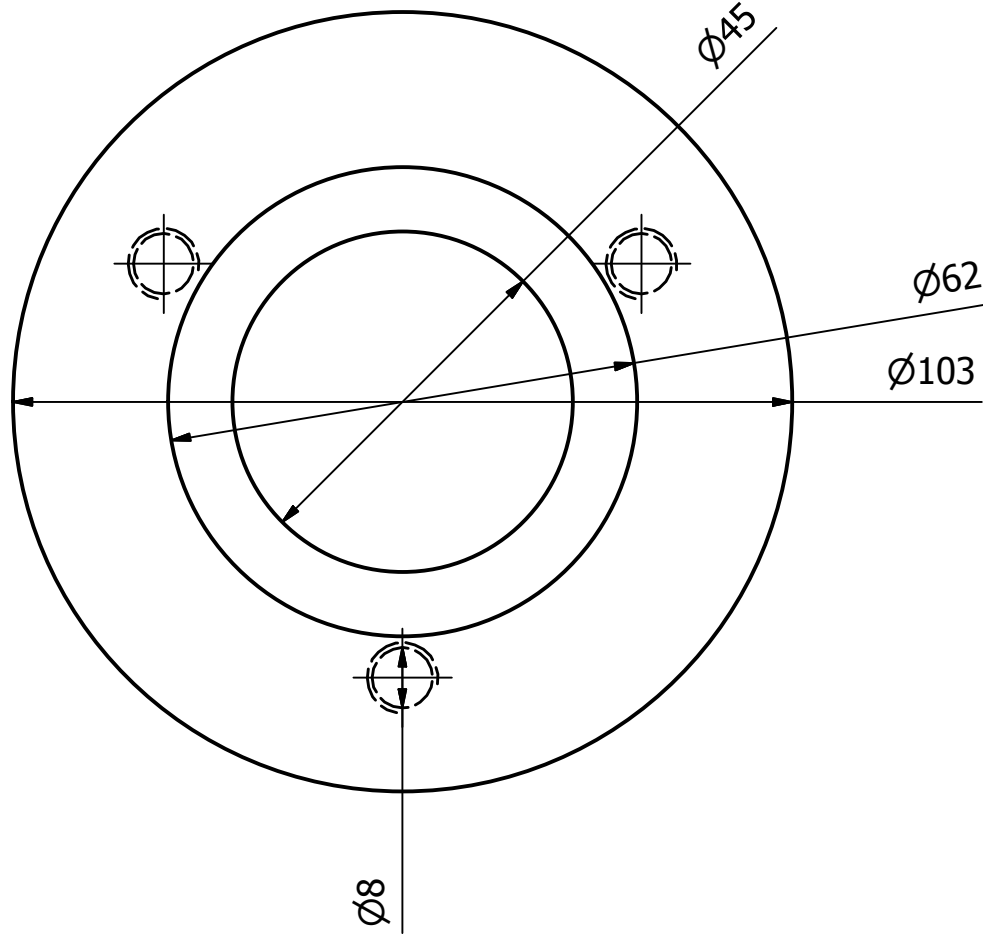
Ál rör
1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 10 / 25

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

MKV (1 : 1)



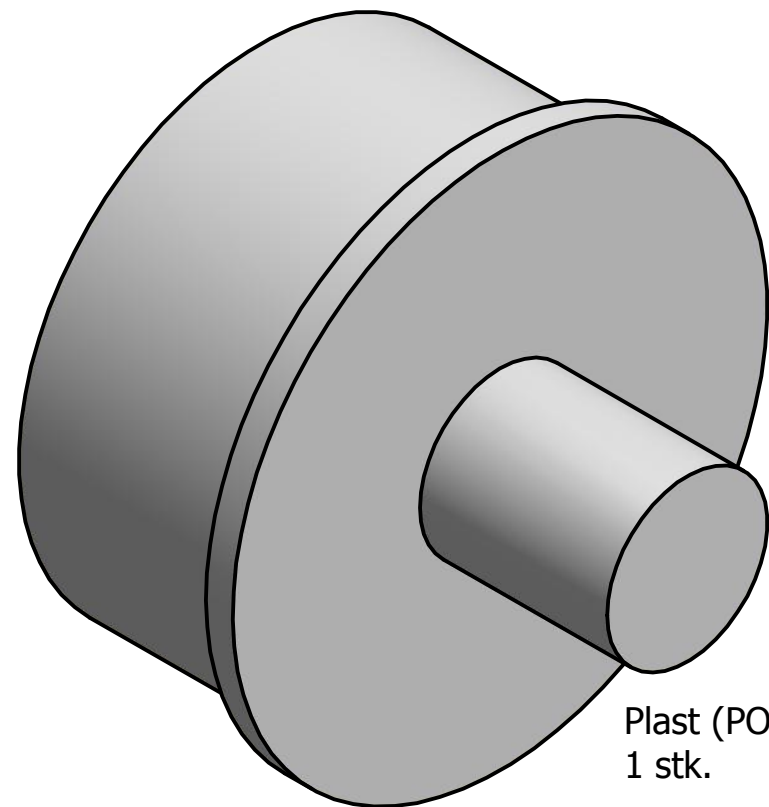
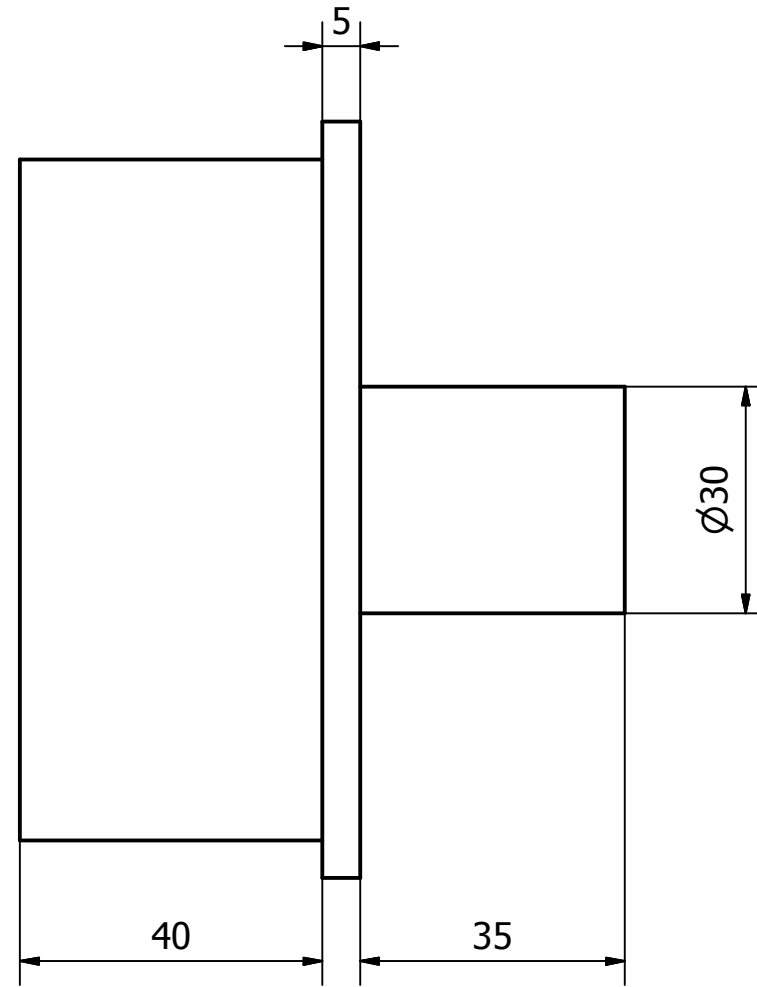
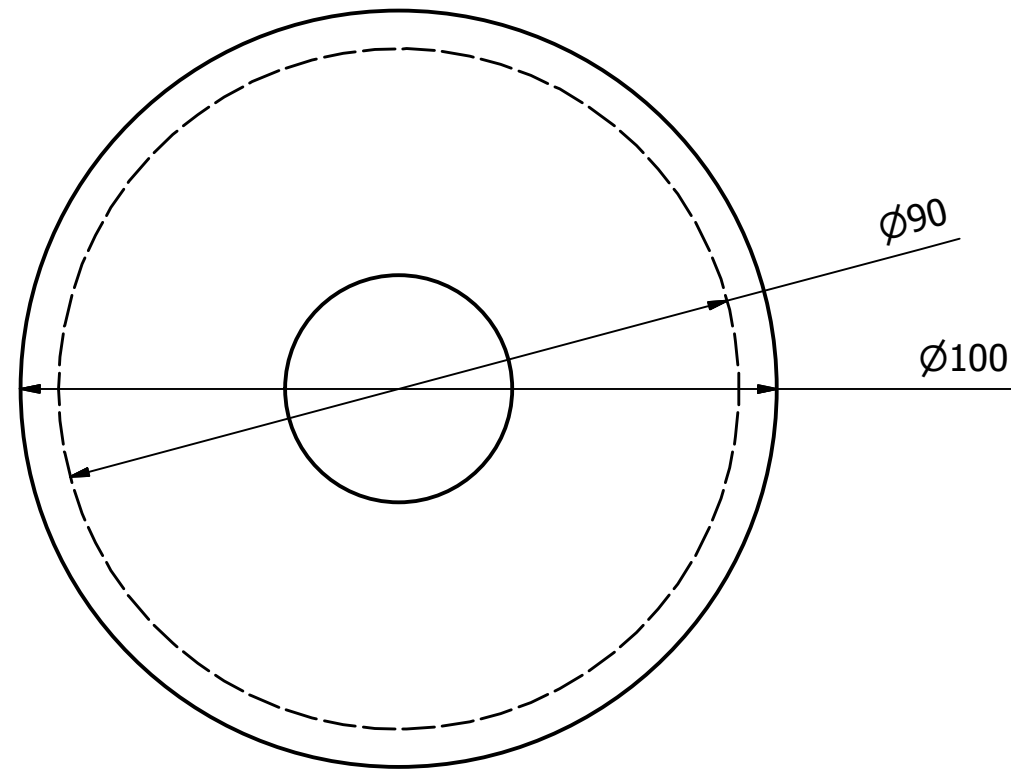
Plast (POM)
1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
2000loka			Edition	Sheet 11 / 25	

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

MKV (1 : 1)



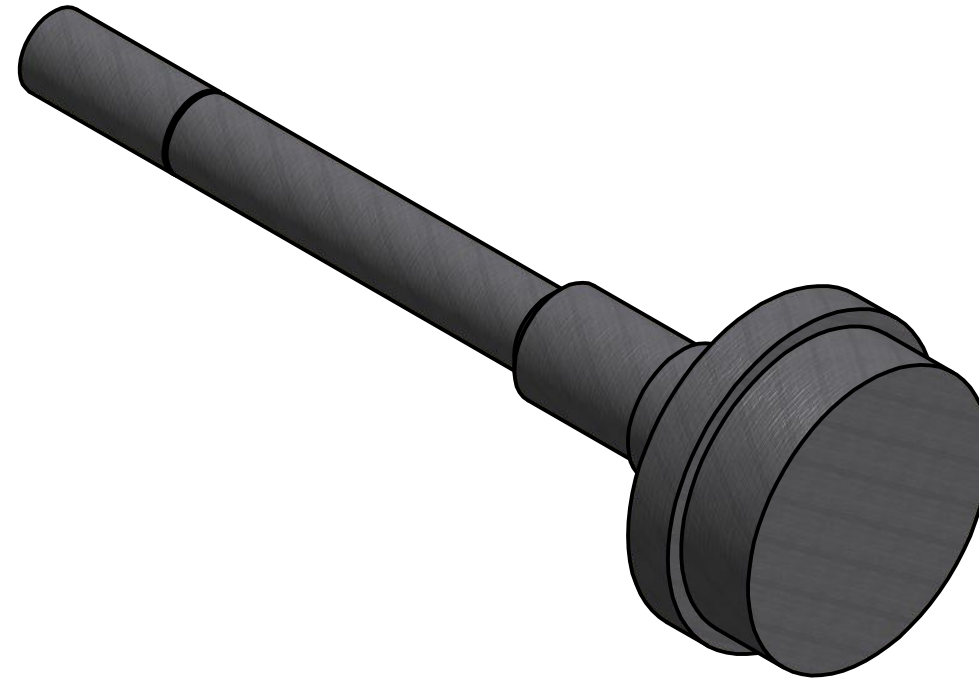
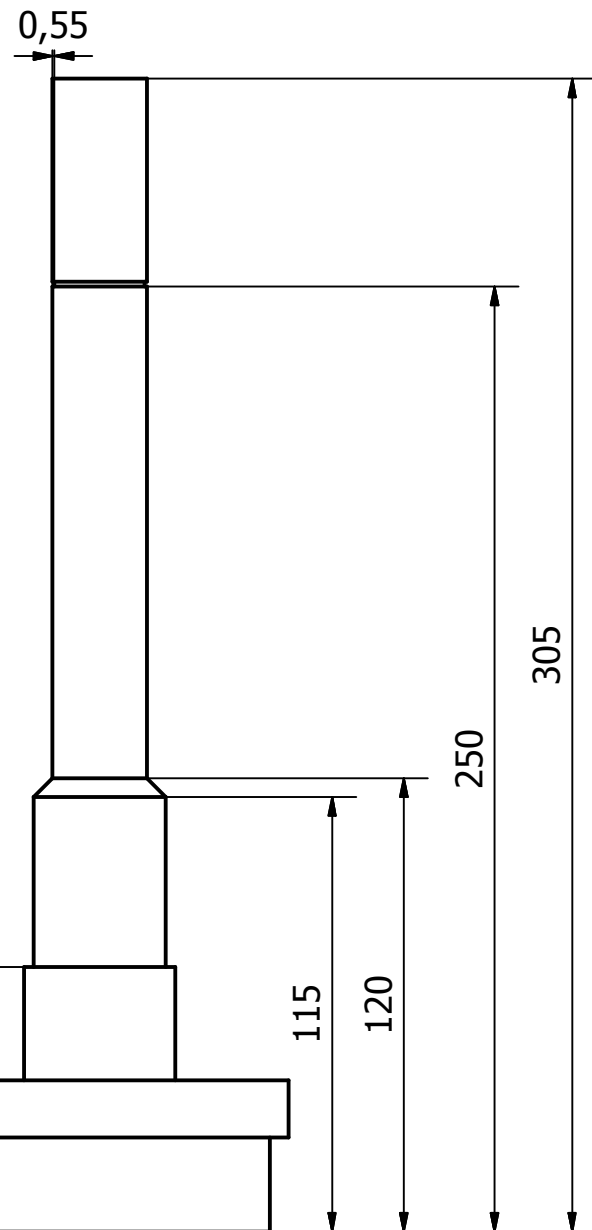
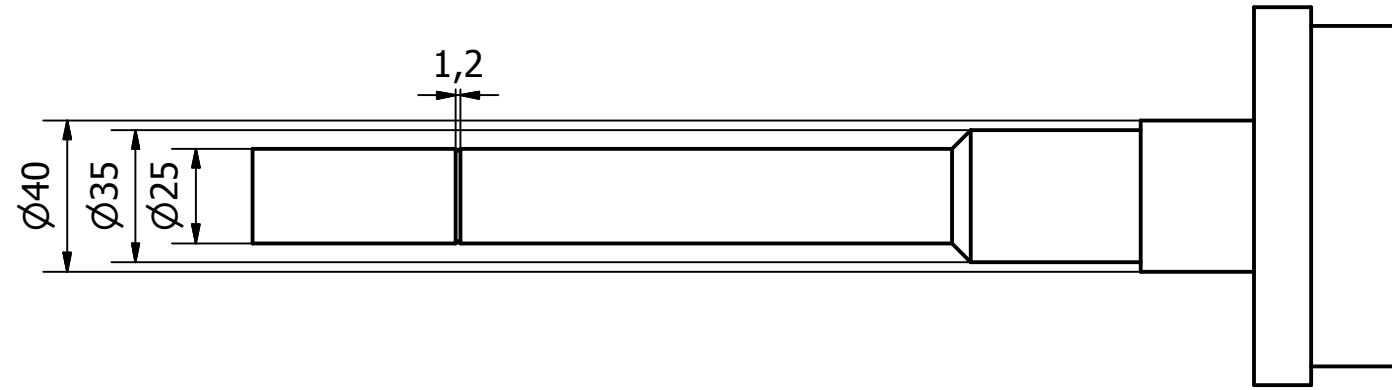
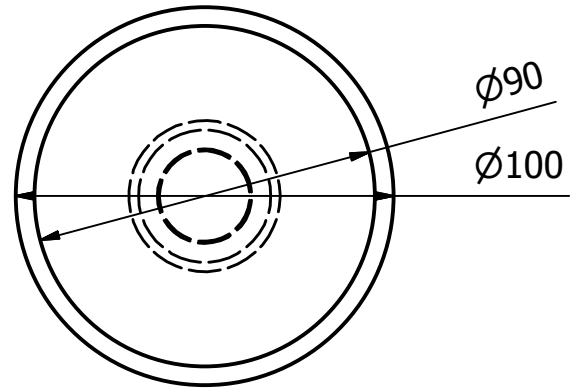
Plast (POM)
1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
			2000loka	Edition	Sheet 12 / 25

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

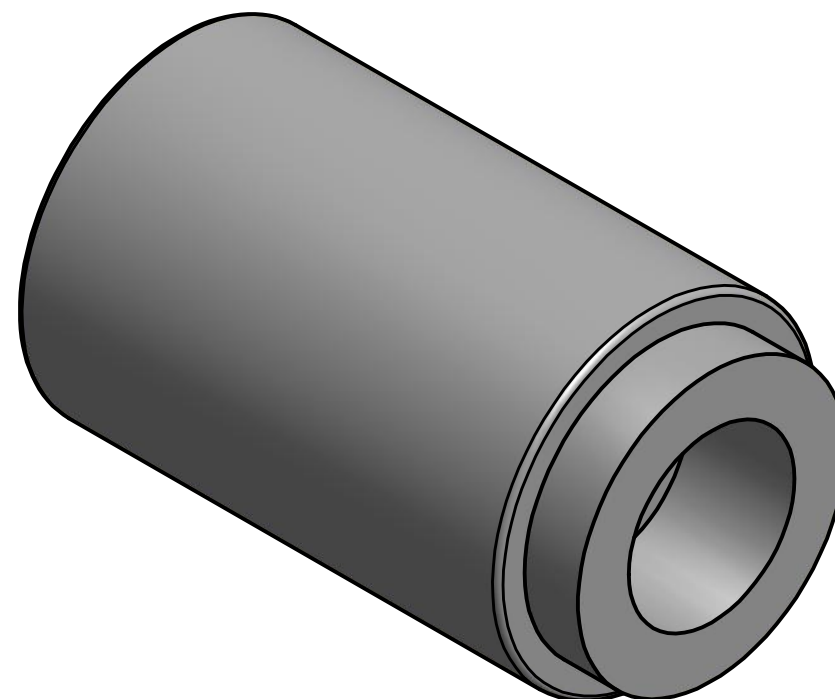
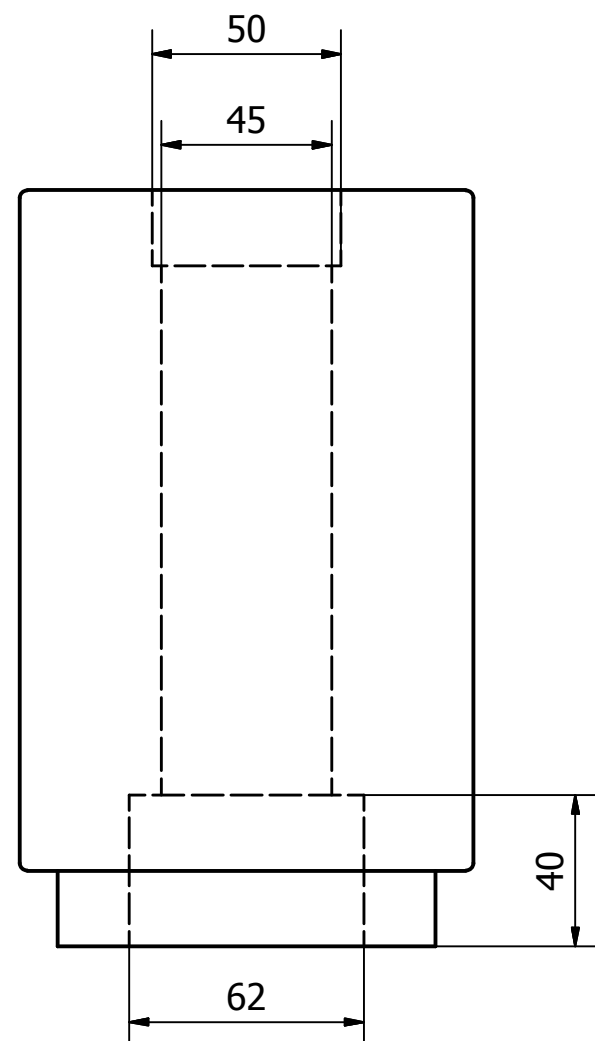
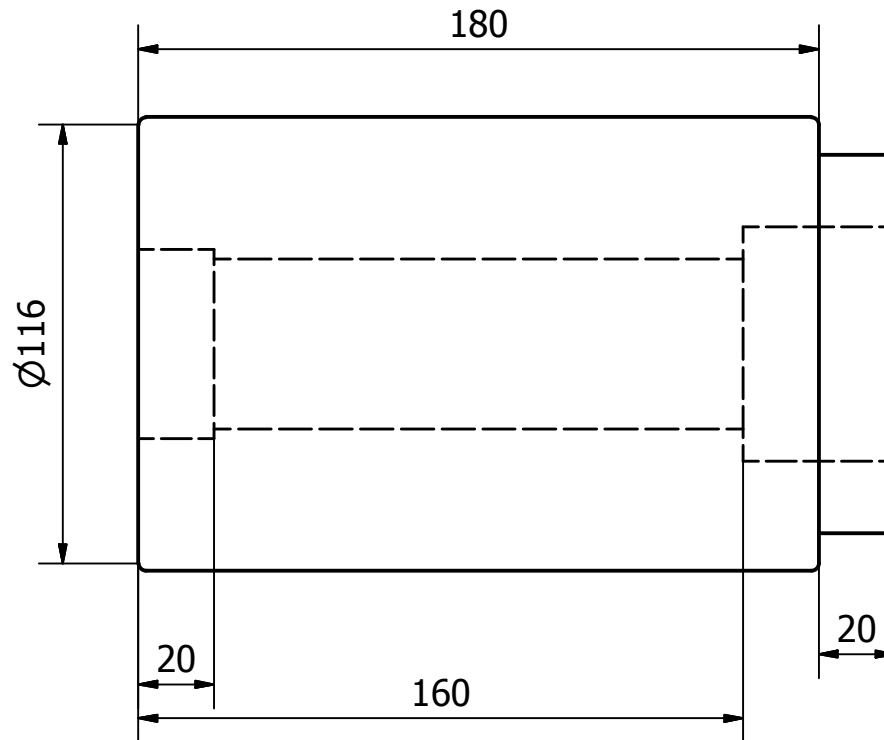
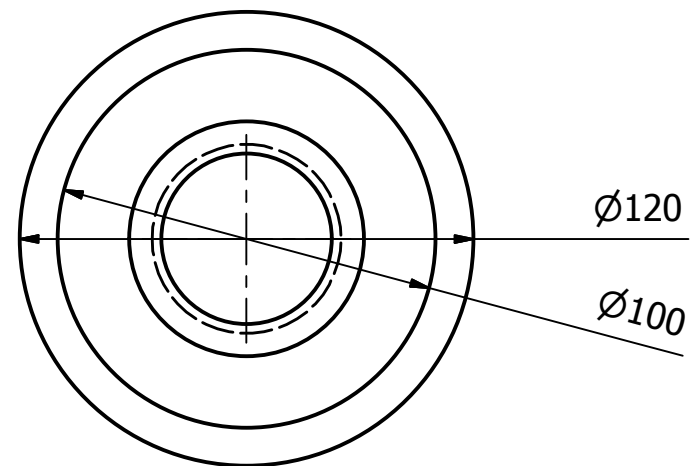
MKV (1 : 2)



Stál öxull
1 stk

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
		Edition	Sheet 13 / 25	

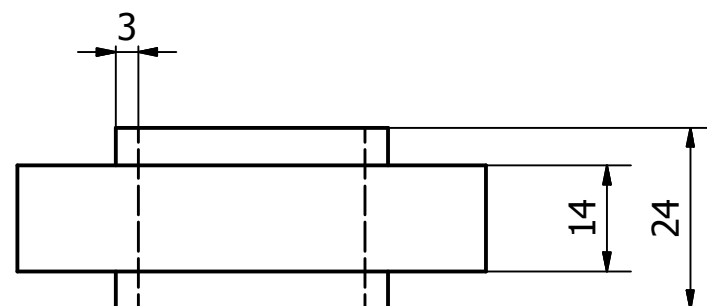
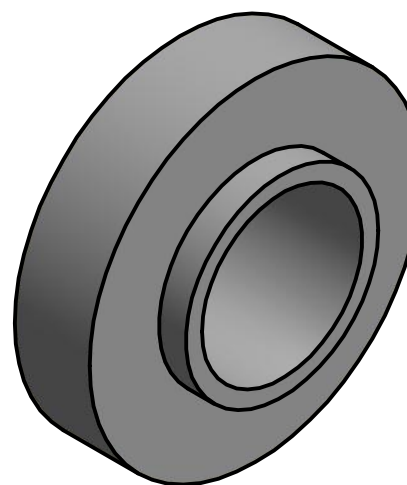
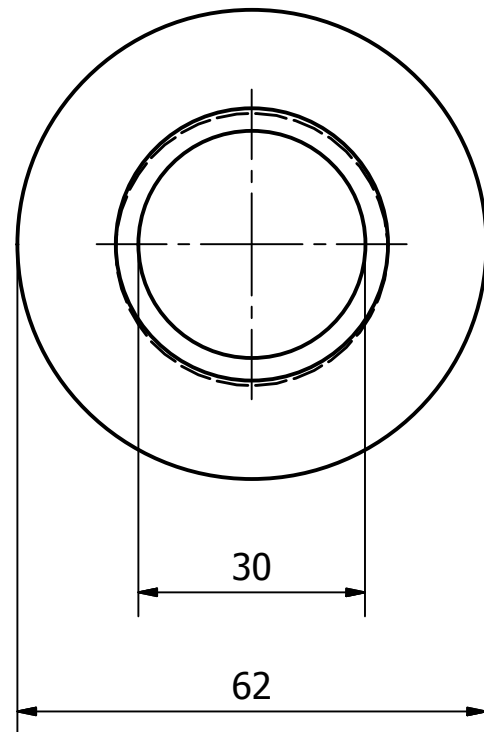
MKV (1 : 2)



Stál
Leguhús
1 stk

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
		Edition	Sheet 14 / 25	

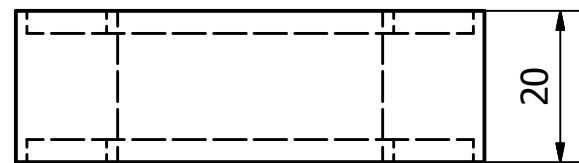
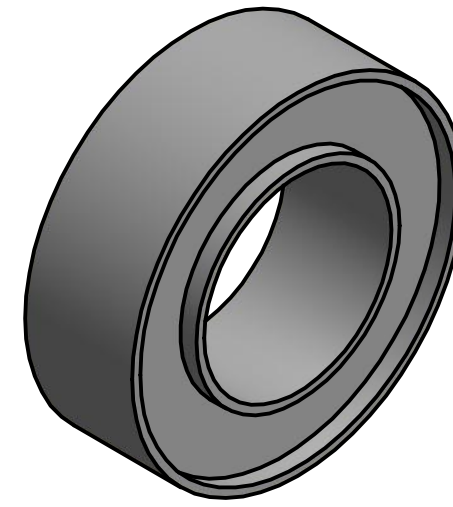
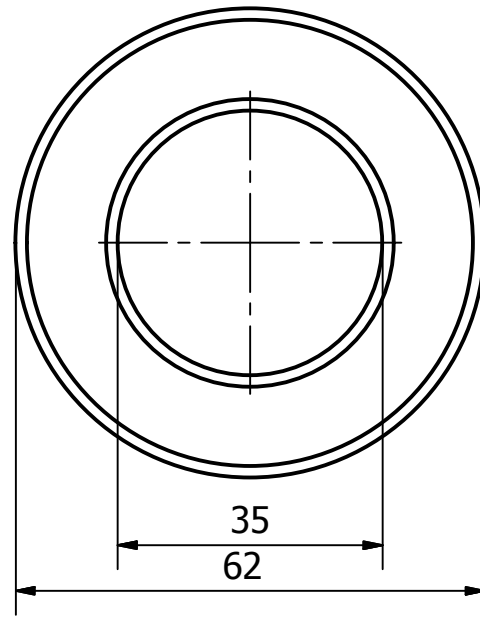
MKV (1 : 1)



Lega
62-30-24
m.brjósti

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		Edition	Sheet 15 / 25

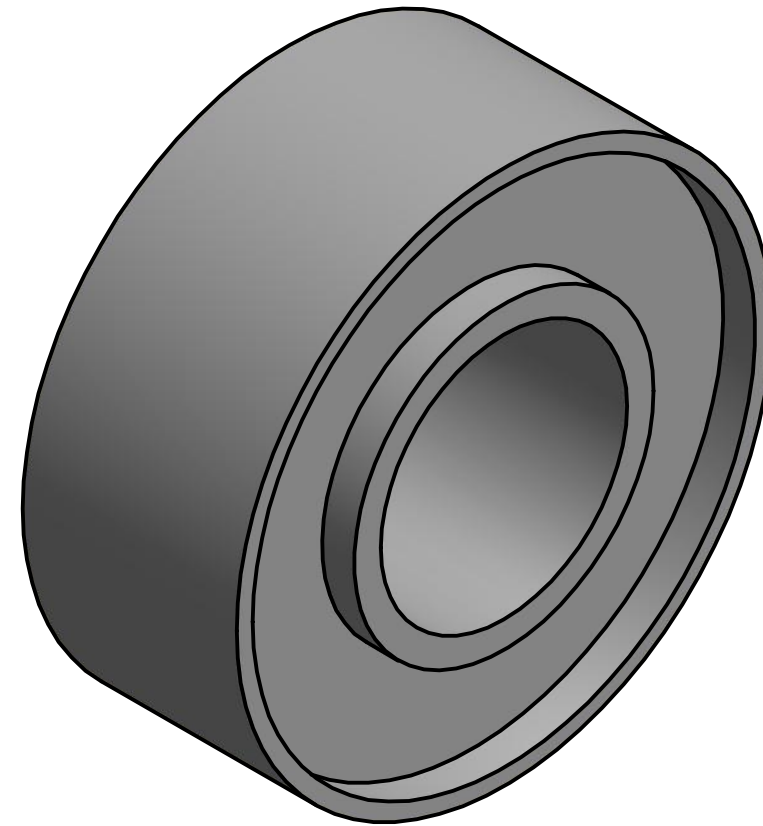
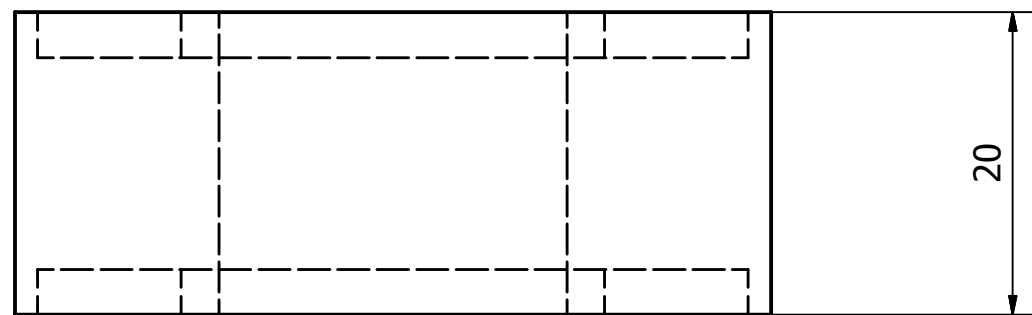
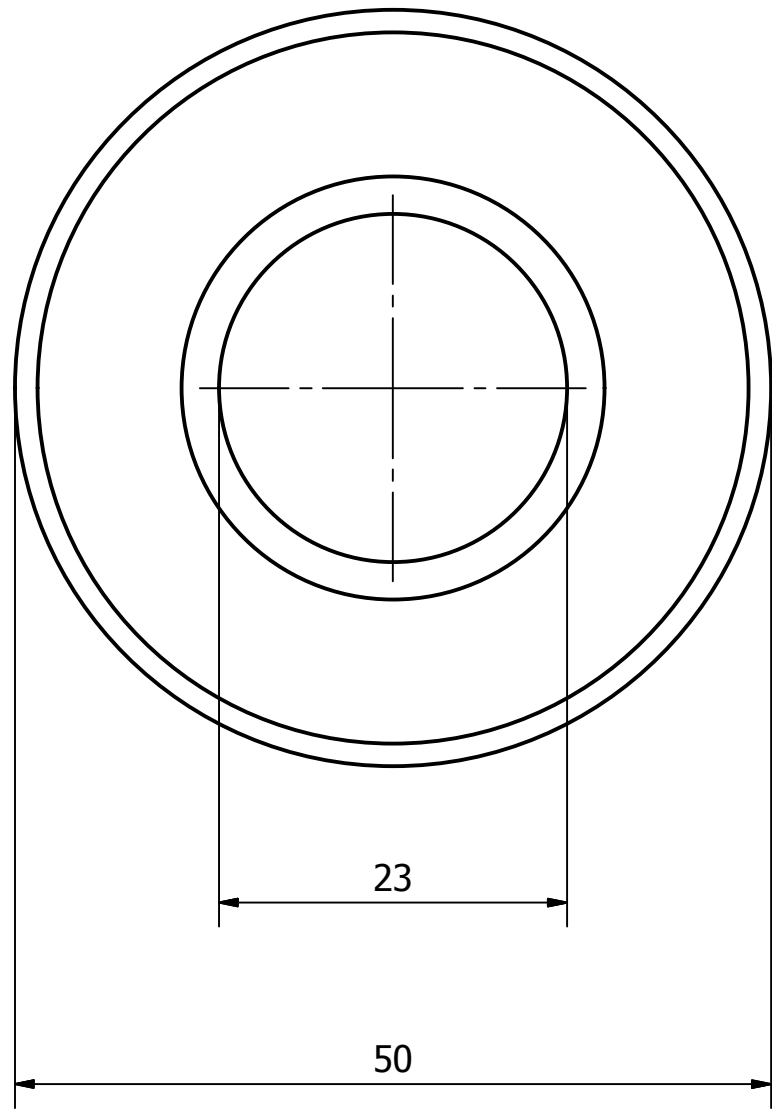
MKV (1 : 1)



Lega
62-35-20

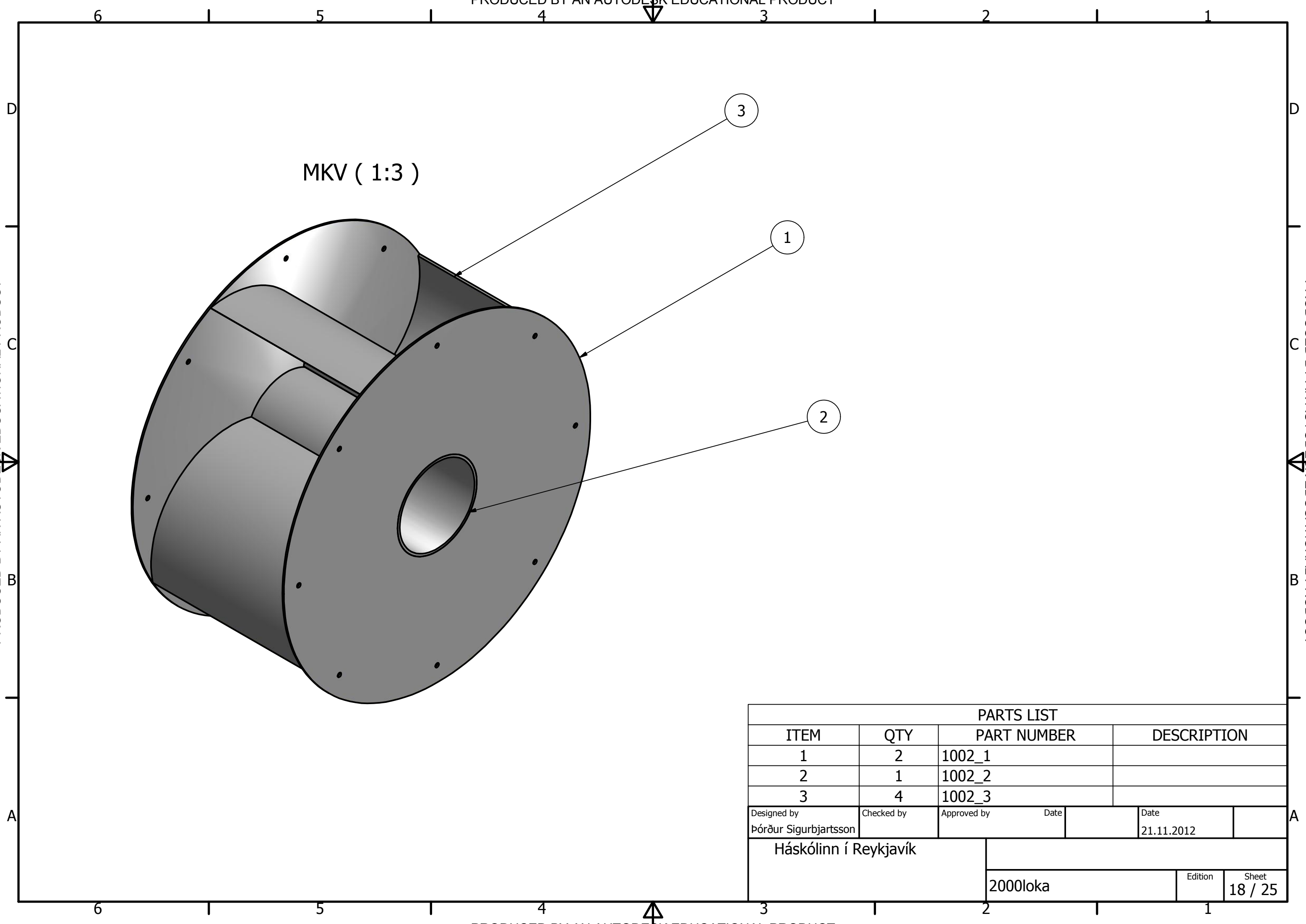
Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
2000loka			Edition	Sheet 16 / 25	

MKV (2 : 1)



Lega.50-23-20

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
			2000loka	Edition	Sheet 17 / 25



MKV (1:3)

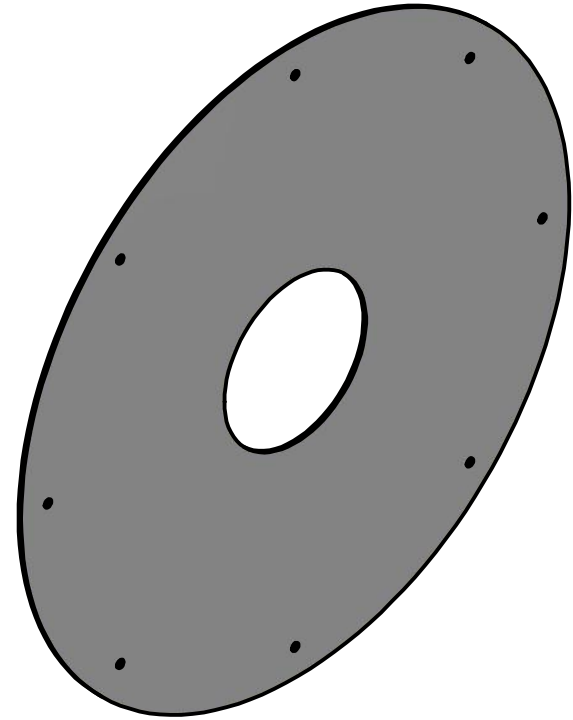
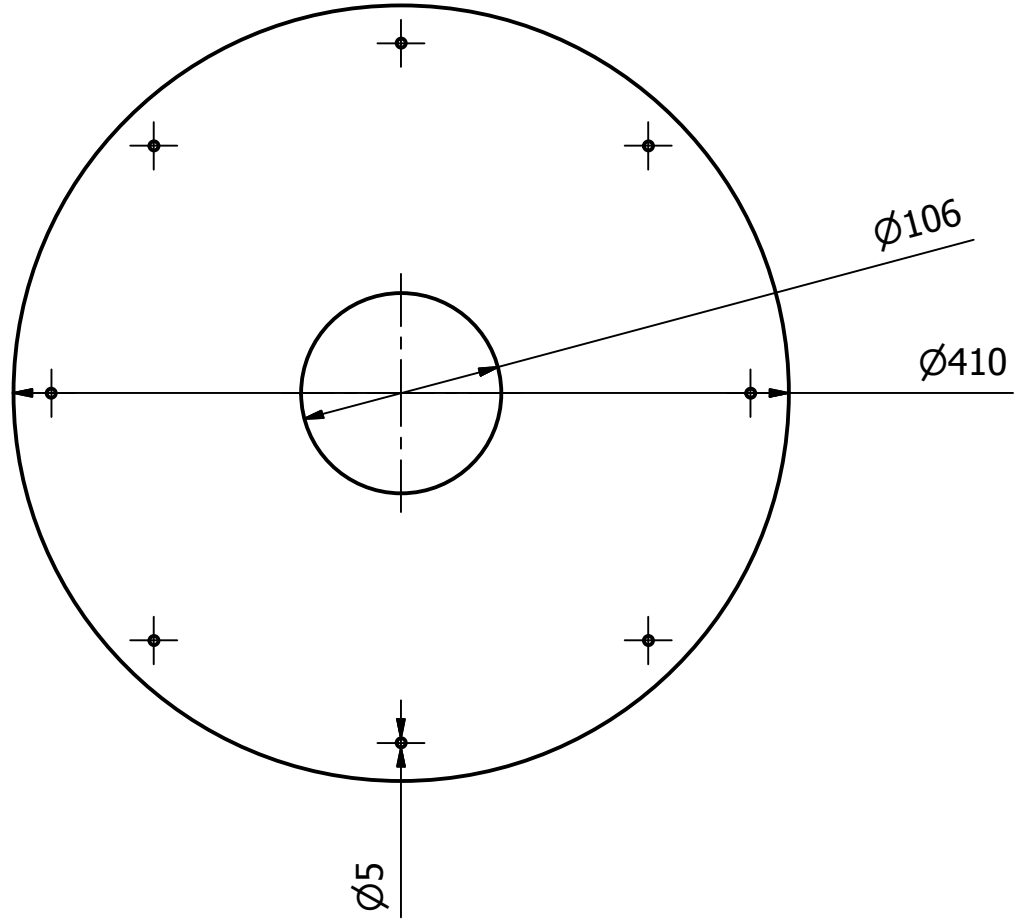
3

1

2

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	1002_1	
2	1	1002_2	
3	4	1002_3	
Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka	
		Edition	Sheet 18 / 25

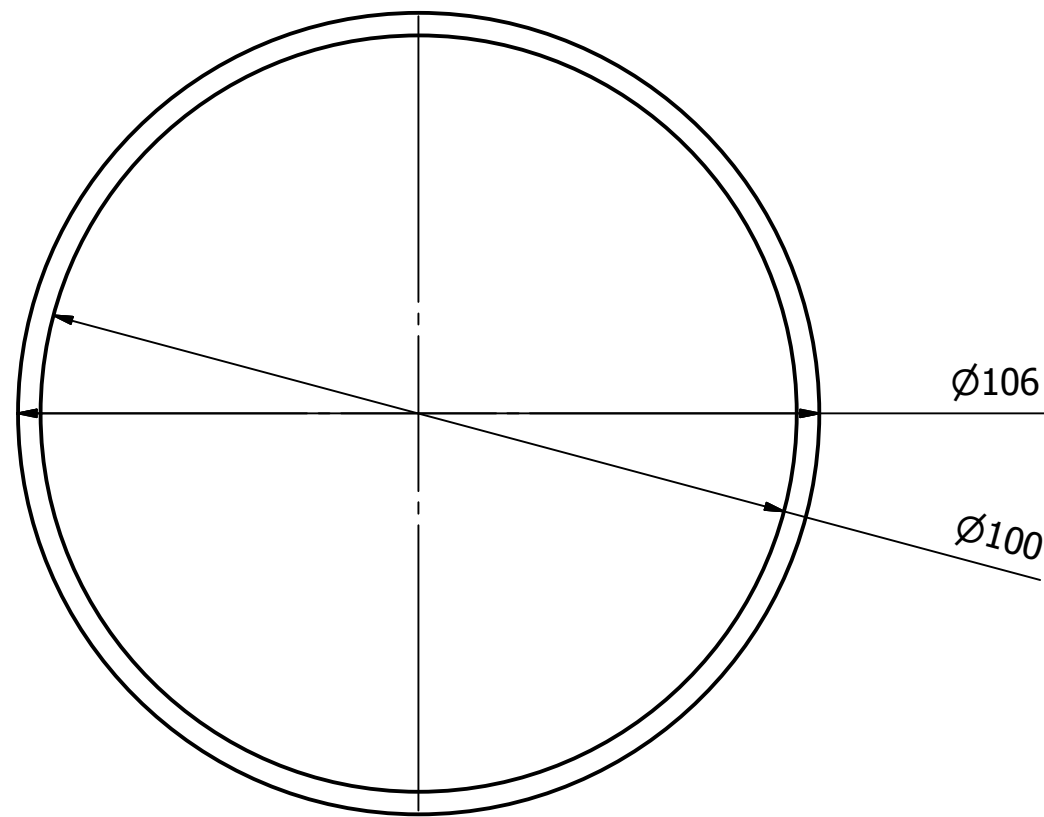
MKV (1:4)



Ál plötur
12 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
			2000loka	Edition	Sheet 19 / 25

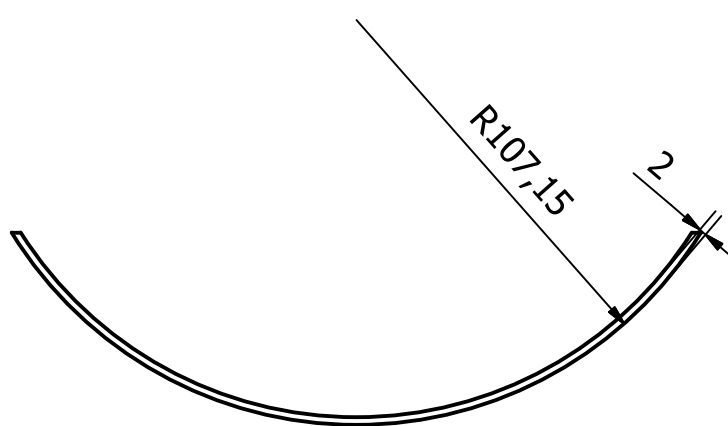
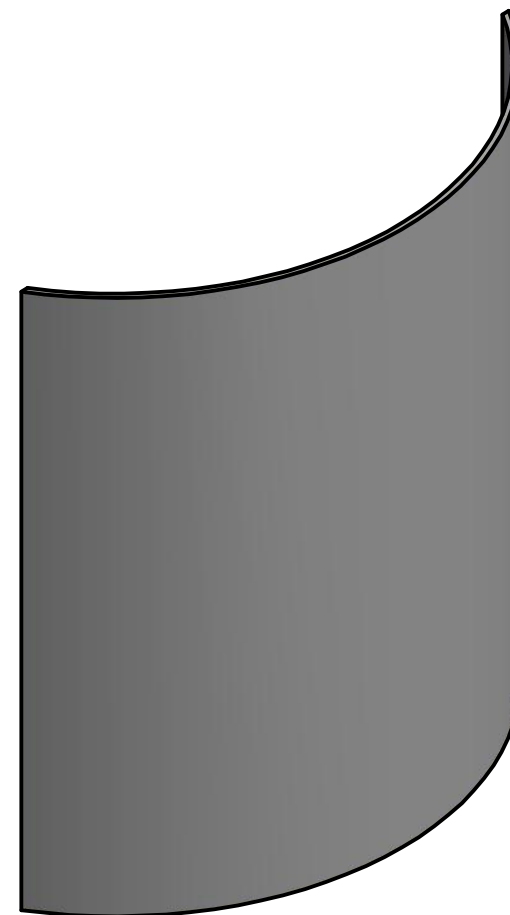
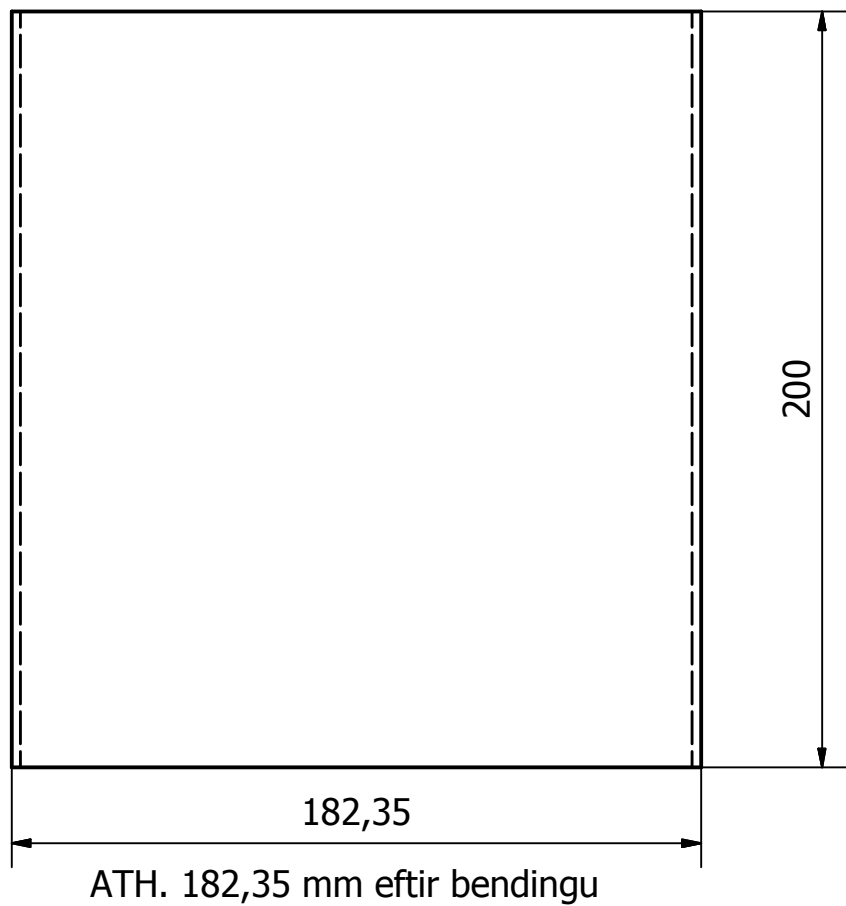
MKV (1:1)



Álör
6 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík				
2000loka			Edition	Sheet 20 / 25

MKV (1:2)



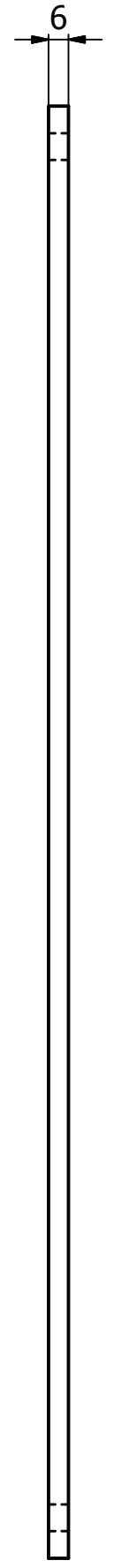
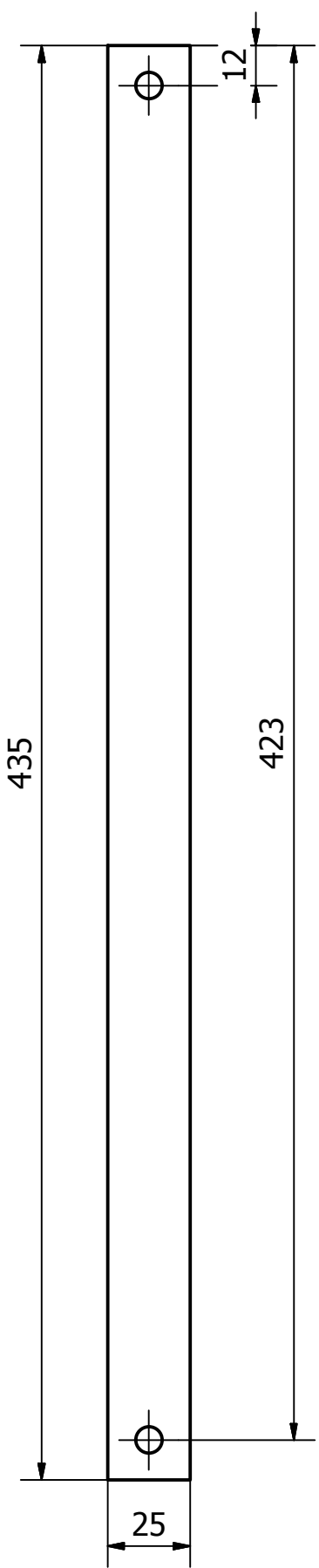
Ál skóflur
 24 stk.
 ATH.
 Flötur plötunnar er 200*212mm
 og beygist með radiús 107,15mm

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012	
Háskólinn í Reykjavík					
2000loka			Edition	Sheet 21 / 25	

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

MKV (1:2)



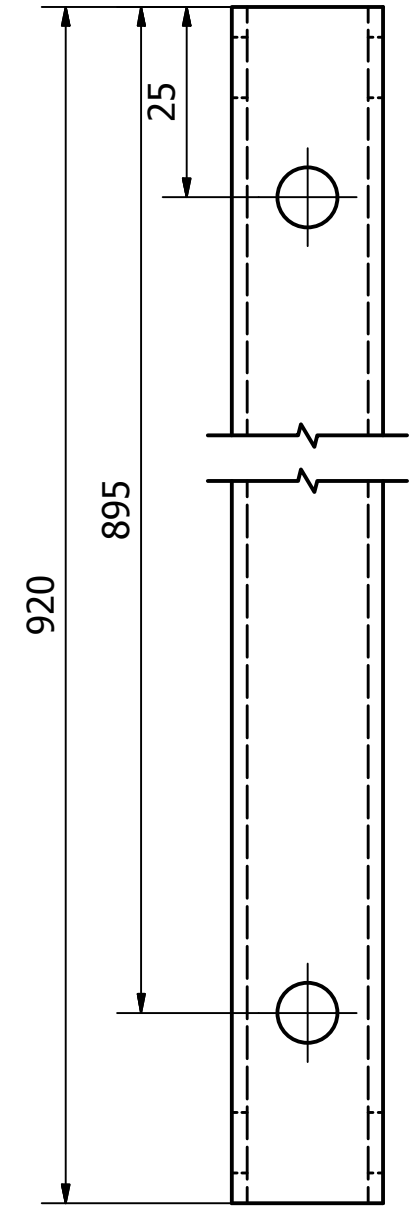
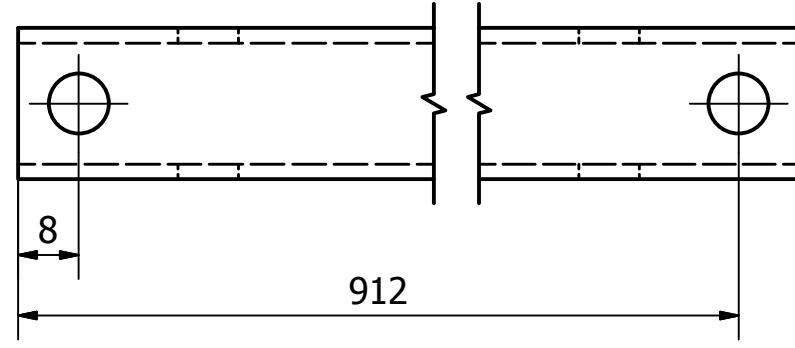
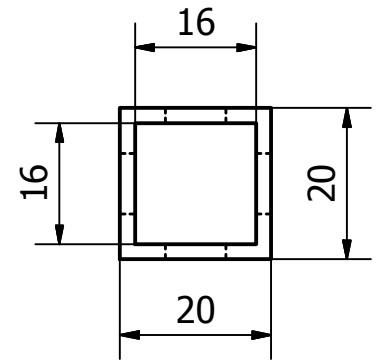
Flatjárn
3 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 22 / 25

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

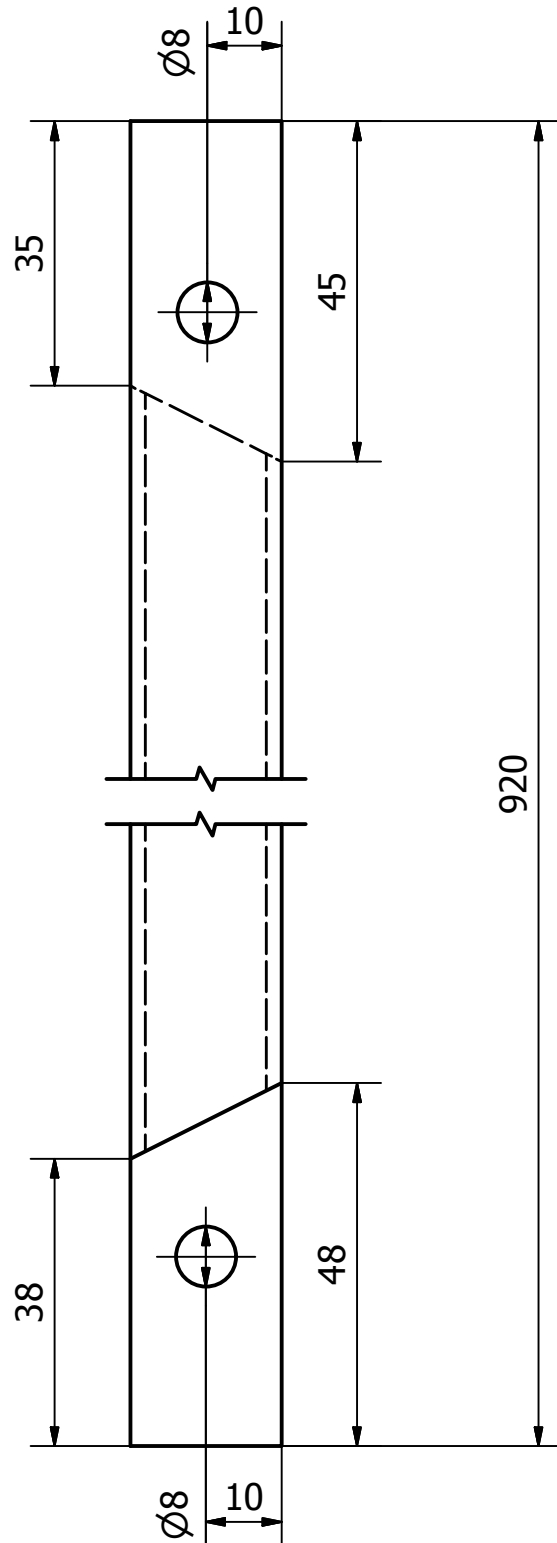
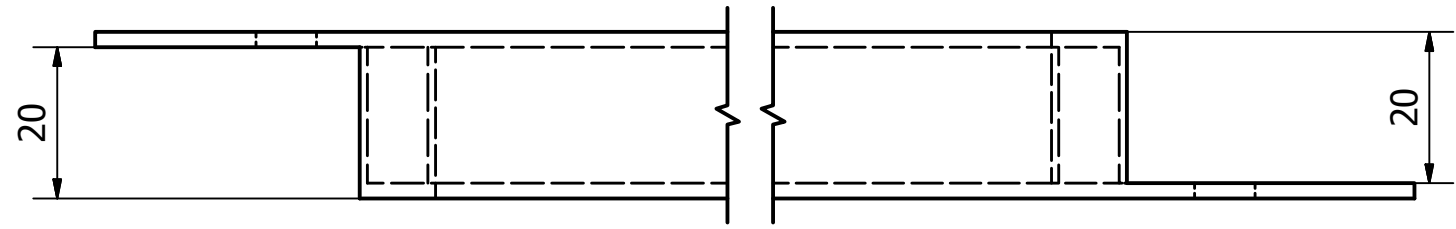
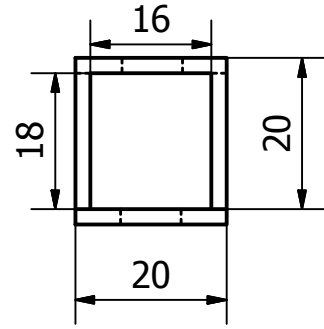
MKV (1:1)



Stál prófíll 1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
		Edition	Sheet 23 / 25	

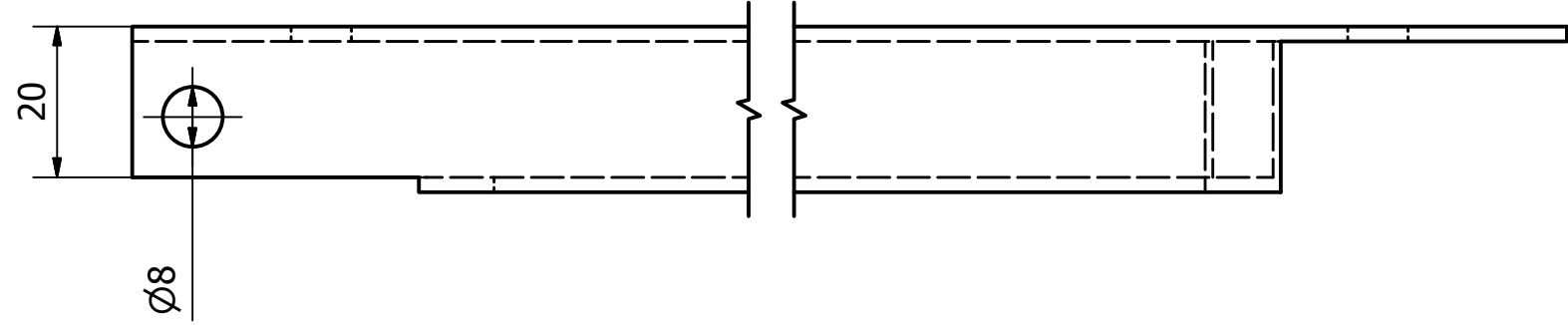
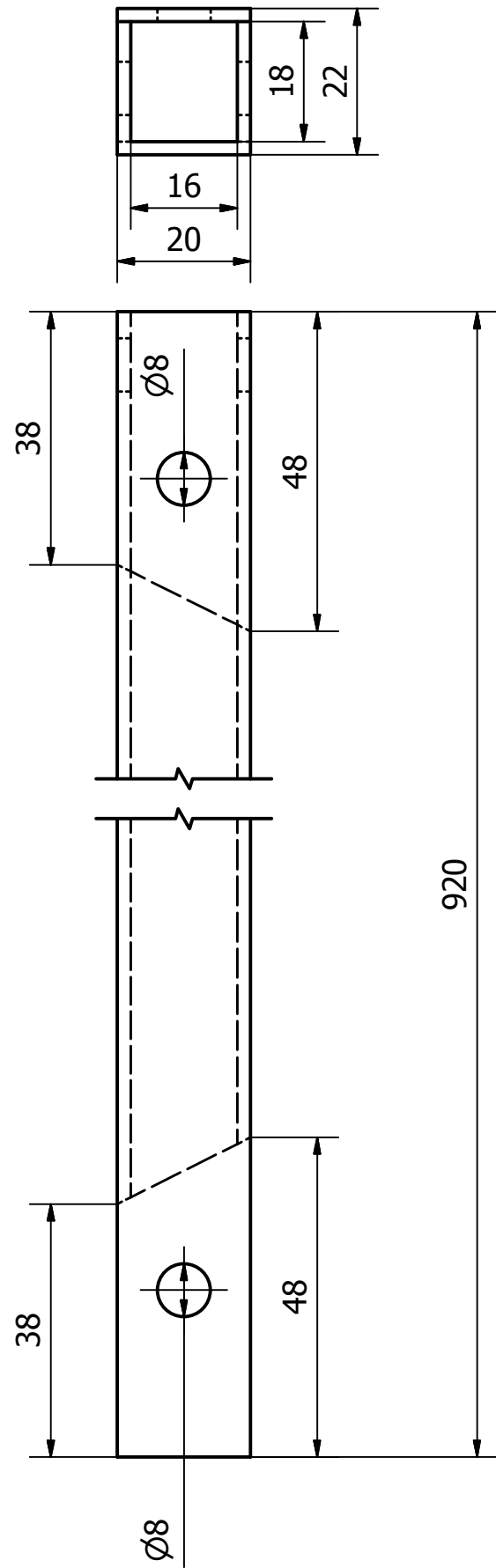
MVK (1:1)



Stál prófill
1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
			Edition	Sheet 24 / 25

MKV (1:1)



Stál prófíll
1 stk.

Designed by Þórður Sigurbjartsson	Checked by	Approved by	Date	Date 21.11.2012
Háskólinn í Reykjavík		2000loka		
		Edition	Sheet 25 / 25	

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT